



## **APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE NO SISTEMA HIDRÁULICO DE DESCARREGADOR DE VAGÕES**

**Wemerson Egner Almeida**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Eduardo de Magalhães Braga

Belém

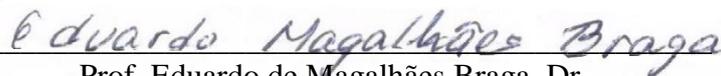
Junho de 2021

**APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE NO  
SISTEMA HIDRÁULICO DE DESCARREGADOR DE VAGÕES**

Wemerson Egnor Almeida

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Examinada por:



---

Prof. Eduardo de Magalhães Braga, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Orientador)



---

Prof. Edinaldo José de Sousa Cunha, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)

---

Prof. Paulo Cordeiro Machado, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

JUNHO DE 2021

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da UFPA**

---

Almeida, Wemerson Egner, 1979-  
Aplicação da manutenção centrada na confiabilidade no sistema hidráulico de descarregador de vagões / Wemerson Egner Almeida - 2021.

Orientador: Eduardo de Magalhães Braga

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, 2019.

1. Aplicação da manutenção centrada 2. Sistema hidráulico 3. Descarregador de vagões I. Título

CDD 670.42

---

*Dedico aos meus familiares,  
especialmente a minha esposa, aos meus  
filhos e a minha mãe.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ser sua criação e ter me dado a capacidade para o desenvolvimento desse projeto.

A minha querida mãe Doracilda por sempre acreditar no meu potencial e apoio ao longo de todo esse tempo. Ao meu padrasto Gelson (in memoriam) com todo amor e carinho.

Em especial a minha esposa Rainara, minha fonte inspiradora mostrando toda sua força do início ao fim, compreendendo o sacrifício de umas férias tão desejadas para eu passar 14 horas escrevendo e desenvolvendo este trabalho.

Aos meus filhos Caio e Luiza minhas razões para acreditar e construir um mundo melhor.

A minha sogra Sueli no apoio com as crianças e toda sua preocupação no cumprimento dos prazos deste trabalho

Ao meu gerente Sérgio, ao engenheiro Charlyton, a turma da manutenção Daniel, Luã, Wallyson e Kescijones pelo apoio e compreensão.

A UFPA, professores e Orientador Eduardo por entender esse momento único na humanidade que estamos vivendo e apoiar em prazos e análises.

E a todos diretos e indiretos que de uma forma ou de outra também ajudaram no término deste projeto.

*“Escolha uma ideia. Faça dessa ideia a sua vida. Pense nela, sonhe com ela, viva pensando nela. Deixe cérebro, músculos, nervos, todas as partes do seu corpo serem preenchidas com essa ideia. Esse é o caminho para o sucesso”.*

(Swami Vivekananda)

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEP/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M. Eng.)

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA MANUTENÇÃO CENTRADA NA  
CONFIABILIDADE NO SISTEMA HIDRÁULICO DE UM DESCARREGADOR  
DE VAGÕES**

**Wemerson Egnér Almeida**

Junho/2021

Orientador: Eduardo de Magalhães Braga

Área de Concentração: Engenharia de Processos

Este trabalho tem como objetivo propor um conjunto de técnicas para manutenção definidas a partir da aplicação da metodologia Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) no sistema hidráulico de descarregadores. Nesse estudo foi feito levantamento dos dados operacionais do equipamento tanto no sistema quanto em campo e após, determinou-se os riscos inerentes as consequências das falhas, classificação de todo sistema quanto a falhas evidentes e ocultas, bem como análise de confiabilidade através das medidas de risco e confiança, além da apresentação do equipamento com sua forma construtiva e o seu contexto operacional. Como resultado foi proposto um modelo esquemático para aplicação das tarefas de manutenções cobrindo todo o sistema hidráulico destes equipamentos e estabelecendo análises de componentes e principais causas de falhas. Como conclusão foi verificado a ausência de planos de manutenção efetivos equilibrando risco, custo e disponibilidade e de uma gestão e sistema para dados dos eventos operacionais. Adicionalmente verificado um ganho médio de 54% em relação a quantidade de falhas, com participação de ações do presente trabalho.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M. Eng.)

**APPLICATION OF THE RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE  
METHODOLOGY IN THE HYDRAULIC SYSTEM OF A CAR DUMPER**

**Wemerson Egner Almeida**

June/2021

Advisor: Eduardo de Magalhães Braga

Research Area: Process Engineering

This work aims to propose a set of maintenance techniques defined from the application of the Reliability Centered Maintenance (RCM) methodology in the hydraulic system of a car dumper in a mining company. In this study, a survey of the equipment's operational data was carried out, both in the system and in the field, and after that, the inherent risks were determined as consequences of failures, classification of the entire system to obvious and hidden failures, as well as reliability analysis through risk measures and trust, in addition to the presentation of the equipment with its constructive form and operational context. As a result, a schematic model for application of maintenance tasks was proposed, covering the entire hydraulic system of these equipments and elaborating analysis of components and causes of failures. As a conclusion, the absence of effective maintenance plans to balance risk, cost and availability of a management and system for operational events data was verified. Additionally verified an average gain of 54% in relation to the number of failures, with the participation of actions in this work.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 - FATOR COMPETITIVIDADE.....	1
1.2 - A MANUTENÇÃO.....	1
1.3 - METODOLOGIAS.....	2
1.4 - DESCARREGADOR DE NAVIOS.....	2
1.5 - MOTIVAÇÃO.....	3
1.6 - OBJETIVOS.....	4
<b>1.6.1 - Objetivo geral.....</b>	<b>4</b>
<b>1.6.2 - Objetivos específicos.....</b>	<b>4</b>
1.7 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	4
1.8 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	5
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>6</b>
2.1 - A IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO.....	6
2.2 - A HISTÓRIA DA MANUTENÇÃO.....	7
2.3 - TIPOS DE MANUTENÇÃO.....	8
<b>2.3.1 - Manutenção corretiva ou reativa.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3.2 - Manutenção preventiva.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3.3 - Manutenção preditiva.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.4 - Manutenção detectiva.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.5 - Engenharia de manutenção.....</b>	<b>11</b>
2.4 - GESTÃO DE ATIVOS.....	11
2.5 - A SITUAÇÃO ATUAL DA MANUTENÇÃO.....	14
2.6 - CONFIABILIDADE.....	17
<b>2.6.1 - Abordagem quantitativa.....</b>	<b>18</b>
<b>2.6.2 - Abordagem qualitativa.....</b>	<b>19</b>
<b>2.6.3 - Função confiabilidade <math>R(t)</math> e densidade de falhas.....</b>	<b>19</b>
<b>2.6.4 - Função de risco <math>h(t)</math>.....</b>	<b>20</b>
<b>2.6.5 - Tempo de vida residual <math>L(t)</math>.....</b>	<b>20</b>
<b>2.6.6 - Tipos de parâmetros na confiabilidade.....</b>	<b>21</b>
<b>2.6.7 - Distribuição exponencial.....</b>	<b>22</b>
<b>2.6.8 - Distribuição de Weibul.....</b>	<b>22</b>

2.6.9 - Distribuição lognormal.....	23
2.7 - FALHAS FUNCIONAIS.....	24
<b>CAPÍTULO 3 - MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE –</b>	
<b>MCC.....</b>	<b>28</b>
3.1 - TÉCNICAS E MÉTODOS DE PESQUISA.....	28
<b>3.1.1 - Pesquisa bibliográfica.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.2 - Pesquisa documental.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.3 - Pesquisa de campo.....</b>	<b>29</b>
3.2 - TEORIAS E CONCEITOS.....	29
<b>3.2.1 - Seleção, aplicabilidade e frequência de tarefas de manutenção.....</b>	<b>38</b>
3.2.1.1 - Perfil da falha.....	39
3.2.1.2 - Característica para aplicação de tarefas.....	40
3.2.1.3 - Tarefa sob condição.....	41
3.2.1.4 - Módulo preventiva.....	43
3.2.1.5 - Tarefas <i>default</i> .....	45
3.2.1.6 - Tarefa detectiva.....	46
3.2.1.7 - Diagrama final de decisão.....	47
3.3 - DESCARREGADOR DE VAGÕES - DV.....	48
<b>CAPÍTULO 4 - IMPLEMENTAÇÃO DA MCC NO DESCARREGADOR</b>	
<b>DE VAGÕES.....</b>	<b>58</b>
4.1 - SELEÇÃO DE SISTEMA E SUBSISTEMA.....	58
<b>4.1.1 - Diagrama de blocos.....</b>	<b>58</b>
<b>4.1.2 - Interfaces internas e externas do carro empurrador.....</b>	<b>60</b>
<b>4.1.3 - Análise das funções significantes do carro.....</b>	<b>63</b>
<b>4.1.4 - Interfaces internas e externas do giro e travas de vagões.....</b>	<b>66</b>
<b>4.1.5 - Análise das funções significantes grampo e trava.....</b>	<b>68</b>
4.2 - CLASSIFICAÇÃO DA CONSEQUÊNCIA DA FALHA.....	71
<b>CAPÍTULO 5 - CONSEQUENCIA DA FALHA DO CARRO, GRAMPO E</b>	
<b>TRAVA DE ENTRADA.....</b>	<b>75</b>
5.1 - SELEÇÃO DE TAREFAS DE MANUTENÇÃO.....	77
<b>5.1.1 - Cilindro.....</b>	<b>80</b>
<b>5.1.2 - Fluido.....</b>	<b>84</b>
<b>5.1.3 - Filtros de óleo.....</b>	<b>86</b>

<b>5.1.4 - Tubulações.....</b>	<b>88</b>
5.2 - DISCUSSÕES FINAIS.....	91
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>94</b>
6.1 - CONCLUSÕES.....	94
6.2 - SUGESTÕES.....	96
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>97</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Análise quantificada de desempenho, custo e risco.....	13
Figura 2.2	Custo anual de manutenção em relação à receita bruta.....	16
Figura 2.3	Gráfico custos x disponibilidade por tarefa de manutenção.....	17
Figura 2.4	Gráfico modelos de falha curva da banheira.....	25
Figura 2.5	Gráfico característica das falhas de um componente.....	26
Figura 3.1	Esquema de função principal e subsistema.....	31
Figura 3.2	Demonstrativo de uma falha em componente afetando o sistema.....	33
Figura 3.3	Gráfico curva P-F degradação contínua.....	42
Figura 3.4	Falha aleatória com mesmo intervalo P-F.....	43
Figura 3.5	Gráfico ponto ótimo risco x custo.....	44
Figura 3.6	Diagrama de definição de tarefas de manutenção através de diagrama lógico.....	46
Figura 3.7	Diagrama de decisão final para aplicação de tarefas de manutenção.....	48
Figura 3.8	Vista 3D do descarregador de vagões.....	49
Figura 3.9	Vista 3D dinâmica de descarregamento de vagões.....	50
Figura 3.10	Gráfico quantidade de falhas e tempo de horas corretivas por disciplina.....	52
Figura 3.11	Gráfico número de falhas x quantidade de horas corretivas.....	53
Figura 3.12	Equipamento x local da falha.....	53
Figura 3.13	Vista geral sistema giro e travas do vagão.....	54
Figura 3.14	Vista geral do carro posicionador.....	55
Figura 3.15	Representação simples da concepção do sistema hidráulico.....	56
Figura 4.1	Estrutura ordenada de implantação MCC.....	58
Figura 4.2	Divisão do esquema hidráulico em sistema e subsistema.....	59
Figura 4.3	Diagrama de interfaces e funcional do SH carro empurrador.....	61
Figura 4.4	Representação do esquema hidráulico carro através da cadeia de Markov.....	62
Figura 4.5	Gráfico modos de falha carro empurrador.....	63
Figura 4.6	Diagrama de interfaces e funcional do SH giro e carro	66

	empurrador.....	
Figura 4.7	Gráficos modos de falha grampo do giro e trava rodeiro.....	68
Figura 4.8	Tratamento de análise de falha padrão.....	72
Figura 4.9	Diagrama para selecionar a consequência para cada modo de falha.....	73
Figura 5.1	Análise dos modos de falhas, efeitos e causas do carro empurrador, grampo do giro e trava de rodeiro.....	75
Figura 5.2	Estruturação de dados necessários para análise de confiabilidade.....	78
Figura 5.3	Retorno de uma atividade emergencial do equipamento.....	78
Figura 5.4	Retorno de uma atividade emergencial do equipamento.....	79
Figura 5.5	Diagrama de definição de tarefas de manutenção através de diagrama lógico.....	80
Figura 5.6	Cilindros do carro empurrador.....	81
Figura 5.7	H(t) do carro empurrador dos descarregadores.....	82
Figura 5.8	Desenho típico de cilindro dupla ação com amortecimento.....	84
Figura 5.9	Curva h(t) x R(t).....	89
Figura 5.10	Curva de probabilidade da falha.....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Evolução da manutenção.....	7
Tabela 2.2	Fases e stakeholders diretos e indiretos da gestão de ativos.....	12
Tabela 2.3	Ferramentas utilizadas para promover a qualidade.....	15
Tabela 2.4	Aplicação em percentual das tarefas de manutenção.....	15
Tabela 3.1	Planilha de organização dos dados para análise de FMEA.....	34
Tabela 3.2	Tabela para auxílio de preenchimento da severidade.....	35
Tabela 3.3	Tabela para auxílio de preenchimento de detectibilidade.....	36
Tabela 3.4	Tabela para auxílio de preenchimento do nível de ocorrência....	36
Tabela 3.5	Lógica de definição para função significante.....	37
Tabela 3.6	Planilha de conceituação de tarefas de manutenção.....	41
Tabela 3.7	Aplicabilidade e efetividade tarefas proativas.....	44
Tabela 3.8	Histórico de performance de jan/19 a fev/20 com as quantidades de falha.....	51
Tabela 3.9	Lista de componentes de unidades hidráulicas.....	57
Tabela 4.1	Decisão de função significante subsistema energia.....	64
Tabela 4.2	Decisão de função significante subsistema força.....	64
Tabela 4.3	Decisão de função significante subsistema controle.....	65
Tabela 4.4	Decisão de função significante subsistema atuadores.....	65
Tabela 4.5	Decisão de função significante subsistema energia do giro e trava.....	69
Tabela 4.6	Decisão de função significante subsistema força do giro e trava	69
Tabela 4.7	Decisão de função significante subsistema controle do giro e trava.....	70
Tabela 4.8	Decisão de função significante subsistema atuadores do giro e trava.....	70
Tabela 5.1	Classificação das consequências dos modos de falha carro empurrador.....	76
Tabela 5.2	Classificação das consequências dos modos de falha grampo e trava.....	77
Tabela 5.3	Planilha com proposta da política de manutenção para cilindros do carro (SHC).....	83

Tabela 5.4	Planilha com proposta da política de manutenção para cilindros do giro e trava.....	84
Tabela 5.5	Planilha com proposta da política de manutenção para fluidos..	85
Tabela 5.6	Tabela nível de saturação.....	87
Tabela 5.7	Planilha com proposta da política de manutenção para fluidos..	88
Tabela 5.8	Planilha com proposta da política de manutenção em tubulação.....	90
Tabela 5.9	Comparativo de Resultados 2019 x 2021.....	92

## NOMENCLATURA

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
FMEA	FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS - ANÁLISE DO MODO DE FALHA E SEUS EFEITOS
FMECA	FAILURE MODES, EFFECTS AND CRITICALITY ANALYSIS - ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS, EFEITOS E CRITICALIDADE
PAS 55:	PUBLICLY AVAILABLE SPECIFICATION 55
ABRAMAN	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANUTENÇÃO
NASA	NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - ADMINISTRAÇÃO NACIONAL DE AERONÁUTICA E ESPAÇO
TPM	TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE
SAE	SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS
NPR	NÚMERO DE PRIORIDADE DE RISCO
NBR	NORMA BRASILEIRA
TPM	TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE
MCC	MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE
DV	DESCARREGADOR DE VAGÕES
SH	SISTEMA HIDRÁULICO
PCM	PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO
MIL	CONJUNTO DE NORMAS MILITARES AMERICANAS (U.S. MILITARY STANDARDS)

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 - FATOR COMPETITIVIDADE**

As empresas atuais estão situadas em um ambiente altamente competitivo, com constantes mudanças e incertezas. Neste contexto complexo empresas buscam estratégias que a mantenham competitivas e novas empresas surgem com produtos e serviços pioneiros criando assim novos modelos de negócio.

Essa necessidade de mudança numa frequência cada vez menor está atrelada aos fatos históricos que, de alguma forma, mudou valores e necessidades de uma sociedade, acompanhado do avanço tecnológico que mudou a velocidade da informação e a forma das pessoas interagir. Segundo CHIAVENATO E SAPIRO (2009) as empresas deverão ficar atentas a essas mudanças em seu entorno e, no mínimo, acompanhá-las.

### **1.2 - A MANUTENÇÃO**

Os modelos de produção por sua vez também evoluíram e se reinventaram para acompanhar essas novas necessidades e esses novos valores, saindo de um sistema empurrado como o Taylorismo/Fordismo para um sistema puxado e flexível como o Toyotismo (SLACK, CHAMBERS, JOHNSTON, 2009). Atualmente a vanguarda são plantas com configurações autônomas carregadas com inteligência artificial buscando o máximo de otimização e customização, a chamada indústria 4.0.

A manutenção é um dos componentes da produção, e no início surge com a necessidade de aumentar o volume da produção com equipamentos até então de baixa e média complexidade. Um próximo ciclo surge após a segunda guerra, desta vez os equipamentos estão mais complexos, com maior embarque de tecnologias e num cenário de baixa tolerância a eventos de segurança e meio ambiente (SMITH, HINCHCLIFFE, 2004).

Em razão dessas circunstâncias, são criados novos métodos e ferramentas para apoiar na decisão e predizer falhas (MOUBRAY, 2000). Atualmente esse combo de iniciativas buscam o equilíbrio entre custos, riscos e disponibilidade, que torna essencial para competitividade das empresas.

A NBR 55000 (2014) diz que fatores como risco, custos e disponibilidade motivou a manutenção a sair da condição de coadjuvante para uns dos atores principais na estratégia de uma empresa. Agora recursos aplicados neste setor são investimento e não mais gastos desnecessário. Tona-se também necessário um alto nível de governança com metodologias eficientes para estes fatores.

Entretanto, SMITH e HINCHCLIFFE (2004), fortalecido pela pesquisa ABRAMAN (2013), demonstram que as empresas, no universo amostral pesquisado, ainda estão posicionadas nos estágios iniciais da manutenção, denominado “reativo”. Qual o problema? SIQUEIRA (2014) relata que o estágio reativo é onde ocorre de forma imprevisível e inesperada a parada de equipamentos e conseqüentemente da produção, além de ser o tipo de evento mais oneroso. Além disso, como exemplo, a manutenção, em empresas do setor de mineração, tem em média um custo estimado de 8% sobre o faturamento bruto.

### 1.3 - METODOLOGIAS

Dentre várias ferramentas e metodologias utilizadas para aumento da confiabilidade da manutenção tem-se a MCC - Manutenção Centrada na Confiabilidade como referência. A MCC é baseada em métodos qualitativo e quantitativo e tem como propósito definir as políticas de manutenção a serem aplicadas em um determinado equipamento para prevenir falhas funcionais (SAE J1011, 2021).

O método qualitativo estratifica cada falha<sup>1</sup> e sua significância para o sistema através da determinação dos efeitos e consequência de cada falha funcional MOUBRAY (2000). Já o método quantitativo busca transformar todos os eventos de um determinado sistema ou componente em números (SILVA *et al.*, 2005). SIQUEIRA (2014) diz que o método quantitativo deve ser empregado sempre que houver dados disponíveis suficientes.

### 1.4 - DESCARREGADOR DE NAVIOS

Este trabalho visa propor um conjunto de tarefas de manutenção baseado na metodologia MCC no sistema hidráulico de um descarregador de vagões (DG) sugerindo as técnicas de manutenção mais adequadas e customizadas.

O descarregador de vagões (DG) é um equipamento indispensável no setor de mineração, pois tem dupla função na cadeia do processo onde está inserido. A primeira função é descarregar os vagões com minério de ferro para formar carga e carregar navios. A segunda função é manter de forma intermitente a fluidez do ciclo do vagão que é: carregar vagão na mina, transportar vagão da mina até o porto, descarregar vagão no porto.

Para tais objetivos utiliza-se pesquisa bibliográfica, análise documental, aplicação de pesquisas de campo enquanto método de coleta de dados e pesquisa prática operacional (metodologia MCC), enquanto método de análise de dados. Além de se basear em Siqueira (2014), como pressuposto teórico principal, fundamentando a abordagem da MCC frente as anuências, e dialogando com diversos outros autores, que ora complementam, ora discordam deste ponto de vista. Vale reforçar que as referências para este tema em específico ainda têm lacunas consideráveis que também serão, em parte, apresentadas nos próximos capítulos.

O descarregador de vagões é composto por um carro posicionador com translação através de cabos de aço, sistema de giro com dois acionamentos de tração por cremalheiras, moega e alimentadores tipo corrente. Sua capacidade por hora é de 8000 mil toneladas. Nesta planta existe 8 descarregadores e todos com a mesma capacidade de descarga, porém com três projetos e fabricantes diferentes.

A empresa em questão está com saltos de produção na ordem de 10% ao ano, desta forma a redução do tempo de manutenção, aliado a uma alta qualidade das intervenções e um menor número de falhas é de suma importância para alcance dos objetivos estratégico do negócio. Ademais, na sua estratégia de manutenção o fator risco prevalece sobre os demais, dado a fatos relevantes de segurança e imagem ocorridos em outras plantas e por seu direcionamento estratégico.

## 1.5 - MOTIVAÇÃO

O conteúdo supracitado até aqui elenca um conjunto de motivações para execução deste projeto. Inicia com a importância do equipamento e o potencial de perdas que este pode gerar no processo onde está inserido. Outro ponto é a escassez de trabalhos científicos com esse tipo de equipamento, pois a maioria dos trabalhos similares ficam represados dentro das empresas e disponibiliza-lo em amplitude

acadêmica contribuirá com a disseminação do conhecimento ajudando pesquisadores em futuras pesquisas.

Outro motivador é que ao desenvolver trabalhos com essa envergadura habilita e desenvolve o profissional de forma aprofundada não só na metodologia específica, mas também em outros conhecimentos secundários necessários e complementares.

## 1.6 - OBJETIVOS

### 1.6.1 - Objetivo geral

Propor um conjunto de tarefas de manutenção baseado na metodologia MCC no sistema hidráulico de um descarregador de vagões sugerindo técnicas de manutenção mais adequadas e customizadas, com a finalidade de mitigar falhas funcionais intoleráveis.

### 1.6.2 - Objetivos específicos

- Propor um conjunto técnicas de manutenção para mitigar falhas funcionais;
- Privilegiar tarefas de manutenção baseadas em técnicas de condição, captando maior utilização dos componentes e conseqüentemente redução dos custos;
- Identificar falhas potenciais inéditas aplicando controles antes que ocorra a primeira falha;
- Realizar análise qualitativa e quantitativa;
- Identificar oportunidades na gestão de falhas, a fim de propor elementos contribuintes para tomada de decisão.

## 1.7 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

- Criar informações robustas sobre a aplicação do MCC em equipamentos do setor de mineração e disponibilizá-la à área acadêmica e potenciais pesquisadores;
- Desmitificar a complexidade da aplicação do MCC e difundir sua prática;
- Obter conhecimentos mais aprofundados no MCC para serem utilizado em futuras pesquisas, bem como auxiliar a formação de novos profissionais.

## 1.8 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 1 trabalha na contextualização das mudanças ocorridas no modo de produção e em seguida a origem, os motivos e a evolução da manutenção. Também explica o que é a metodologia MCC e seu propósito, após faz um relato do equipamento que será aplicado o MCC com suas principais características e importância. Logo em seguida a motivação explícita, bem como o objetivo geral e específicos, as contribuições do presente trabalho.

O capítulo 2 contextualiza a manutenção falando sobre sua importância e sua história, após é conceituado a gestão de ativos e a situação atual da manutenção no Brasil. Então adentra nos conceitos de confiabilidade, suas abordagens e medidores de confiança como distribuição de Weibull, lognormal como abordagens qualitativa e quantitativa.

O capítulo 3 aborda o MCC e sua aplicabilidade, trazendo os conceitos principais como função, modo de falha, efeitos e consequências, bem como as características das falhas e suas particularidades. Em seguida traz as informações de localidade, operacionais e do sistema hidráulico do descarregador de vagões.

O capítulo 4 trata da aplicação da ferramenta propriamente dita, com a definição dos sistemas e subsistemas, aplicação de diagramas de decisão para determinar funções significantes, após aplica a FMEA e diagramas de decisões sobre aplicação de tarefas de manutenção.

O capítulo 5 mostra a conclusão do trabalho com os principais resultados alcançados e ponderações extraídas do desenvolvimento. Traz as dificuldades de tabulação de dados, após é sugerido iniciativas para a continuidade da pesquisa sobre outra perspectiva.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados informações e conceitos necessários para a aplicação da MCC, que fundamentarão o objetivo geral deste projeto. Dessa forma contextualizará a manutenção, com seus conceitos e aplicabilidade. Será exposto também o passo a passo da metodologia proposta, bem como indicadores demonstrando a situação atual da manutenção no Brasil.

#### 2.1 - A IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO

A competitividade tomou forma global abrindo caminho para um complexo e dinâmico mercado, onde empresas buscam seu lugar e a sua sobrevivência. Chiavenato e SAPIRO (2020) classifica esse momento como sendo de “desconexão, de mudança e de imprevisibilidade”. Desfigurados por constantes alterações de ciclos econômicos, política, tecnologias, legal e social. Em consequência disso, as empresas devem antecipar-se as novas tendências e aos novos comportamentos a sua volta buscando melhorias, inovações e qualidade intrínseca dos seus produtos e serviços constantemente.

SLACK (2009) atribui competitividade a 5 fatores, são eles: confiabilidade, custo, flexibilidade, qualidade e velocidade. Dessa forma a administração da produção de qualquer empresa de bens ou serviços tem função estratégica relevante, devido a sua influência nos fatores competitivos e porque, em sua maioria, é onde está alocado a maior quantidade de bens e funcionários da organização.

A produção é composta por departamentos, sendo um deles a manutenção, que é responsável conservação dos ativos<sup>1</sup> de uma empresa. A manutenção é definida pela ABNT (5462/1994) como o “conjunto de ações técnicas e administrativas que tange como um todo o ramo e área industrial como um sistema único que destina manter ou recolocar um equipamento, instalação ou maquinário de um determinado setor”, ou seja,

---

<sup>1</sup>Ativo - um item, coisa ou entidade que tem valor real ou potencial para uma organização (NBR 5500 2014).

sua principal função é manter em ordem o funcionamento dos equipamentos através de intervenções corretas e eficazes.

## 2.2 - A HISTÓRIA DA MANUTENÇÃO

Os principais autores como MOUBRAY (2000), SIQUEIRA (2014) e KARDEC (2019) dividem em gerações a história da manutenção, atrelando essa evolução a fatos histórico que em algum momento alteraram o ciclo produtivo, tornando a manutenção uma área estratégica para o negócio. Abaixo segue essa linha do tempo baseada em KARDEC e NASCIF (2009) e disposto na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Evolução da manutenção.

EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO				
	Primeira Geração	Segunda Geração	Terceira Geração	Quarta Geração
Escala de Ano	1940 à 1950	1960 à 1970	1980 à 1990	Atual
Aumento das expectativas em relação a	Consertos após falha	*Disponibilidade Crescente * Maior vida útil	* Maior Confiabilidade * Maior	* Maior Confiabilidade * Maior Disponibilidade * Maior influencia nos
Visão quanto a falha no equipamento	Todos equipamentos falham por vida útil	Comportamento curva da banheira	Existencia de 6 padrões de falha	Redução drásticas de falhas prematuras
Mudanças nas técnicas de manutenção	Habilidade voltados para reparo	* Planejamento Manual * Computadores Lentos * Manutenção Preventiva por tempo	* Monitoramento da condição * Monitoramento Preditivo * Analise de Risco * Computadores velozes * Softwerc Pontentes e dinâmicos * Projetos voltados a confiabilidade * Contratações por mão de obra e serviços	* Monitoramento da condição * Monitoramento Preditivo * Analise de Risco * Computadores velozes * Softwerc Pontentes e dinâmicos * Projetos voltados a confiabilidade * Contratações baseadas em performance * Anàlise de Falha * Técnicas de confiabilidade * Engenharia de manutenção * Projeos voltados a confiabilidade, manutenabilidade e ciclo de vida dos ativos

Fonte: Adaptado de KARDEC E NASCIF (2009).

A primeira geração era baseada na manutenção corretiva também chamada de reativa, ou seja, a estratégia era o reparo após quebra, apoiado em toda conjuntura da

época com baixa complexidade dos equipamentos e níveis de produção. Esse período é compreendido antes da segunda guerra mundial.

A segunda geração inicia no período pós segunda guerra, impulsionada pelo forte crescimento da demanda de produtos e serviços, dando origem a novos equipamentos, plantas industriais e modelos de produção, adquirindo maior complexidade em todos os âmbitos. Com esse novo cenário o gerenciamento da manutenção baseado somente em corretiva afetava drasticamente fatores como produtividade e custo, então surge o modelo de gerenciamento da manutenção baseado em intervalos fixo de tempo, com o objetivo de intervir antes da quebra denominada de manutenção.

Já na década de 70, a terceira geração, é uma maturação do estágio anterior, neste caso com uma engenharia de manutenção robusta, novas tecnologias na área de processamento de dados e telecomunicações como também o início da automação, contribuindo assim para maior mecanização dos processos e conseqüentemente adquirindo grandes proporções tanto em dimensões quanto na capacidade fabril. Nesse período a intolerância e exigências em relação a segurança e meio ambiente cresce, principalmente com eventos catastróficos ocorridos nesse período. A partir de então, ter confiabilidade<sup>2</sup> é fundamental nos processos produtivos, e, é o período onde surge a manutenção preditiva, bem como o uso de metodologias como a MMC - Manutenção Centrada na Confiabilidade.

A quarta geração é delimitada a partir da segunda metade da década de 90, compilando as iniciativas das gerações anteriores e perpassa por um período de exigência e fiscalização ainda maior no quesito saúde, segurança e meio ambiente. O uso da preditiva e técnicas de monitoramento ganham espaço na estratégia de manutenção das empresas, bem como a prioridade de aplicar confiabilidade para auxiliar na tomada de decisão, pleno uso da engenharia de manutenção e de novos projetos e contratações baseadas na performance.

### 2.3 - TIPOS DE MANUTENÇÃO

Hoje as empresas de forma geral buscam um ponto ótimo onde cada equipamento ou componente receba o tipo de manutenção mais adequada e eficaz de

---

<sup>2</sup> Confiabilidade é capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo (NBR 5462, 1994, p.5).

acordo com as suas características e atrelado ao planejamento estratégico da empresa (Marquez, 2006 *apud* CAVALCANTI, 2011).

Será adotado nesse trabalho o termo tarefa ou técnica de manutenção para expressar cada modalidade e serão divididas em duas vertentes, uma é manutenção proativa contemplando técnicas de manutenção preventiva e por condição. A segunda é a modalidade *default* abrangendo manutenção reativa e detectivas.

### **2.3.1 - Manutenção corretiva ou reativa**

Faz parte da modalidade de tarefas *default* e é definida segundo ABNT 5462 (1994) com sendo “manutenção efetuada após a ocorrência de um pane destinada a colocar um item em condições de executar uma função requerida”. Ou seja a atuação é reativa, após ocorrer uma falha parando de forma imprevisível o equipamento.

NASA (2018) discorre sobre os efeitos colaterais da alta frequência desta modalidade, exemplos como a necessidade de grandes estoques para ficar disponível, caso contrário o tempo para reconexão será longo, além da perda do potencial da equipe de manutenção, pois os esforços poderiam estar voltados a prevenção de falhas e melhores práticas.

SMITH e HINCHCLIFFE (2004) comentam sobre a má qualidade dessas intervenções, por não terem um planejamento prévio e ainda a necessidade do retorno mais breve possível. Neste casos acrescenta ainda que em 50% das vezes esses tipos de intervenção exigem retrabalhos.

### **2.3.2 - Manutenção preventiva**

Pertence a modalidade de tarefas proativas e HAROLDO RIBEIRO (2016) conceitua a manutenção preventiva como uma “combinação de métodos de manutenção baseada no tempo e baseada nas condições para manter o equipamento funcionando por meio do controle de seus componentes, montagens, sub montagens, acessórios e outras partes”. SIQUEIRA (2014) categoriza esses dois segmentos como restauração preventiva e substituição preventiva. Na restauração há um gatilho que é acionado através da detecção de anomalias proveniente dos processos de inspeções por condição como: ultrassom, análise de vibração, inspeção visual, análise de óleo, dentre outras.

Já na preventiva por substituição COELHO (2016) diz que é uma troca ou ajustes de itens oriundos de planos sistemáticos, onde estes foram criados previamente através de um estudo baseado num histórico de corretivas e de dados técnicos que permitem uma previsibilidade do tempo de vida do componente. SIQUEIRA (2014) explica a preferência da escolha pela manutenção preventiva por restauração sempre que está for viável, porque tem um custo menor e nem sempre é necessário trocar um item completo.

### **2.3.3 - Manutenção preditiva**

Integra a modalidade de tarefas pró ativas e segundo definição ABNT 5462 (2004) é “aplicação sistemáticas de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragens, para reduzir a mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva”. Já RIBEIRO (2016) diz que é “todo o trabalho de acompanhamento e monitoração das condições da máquina, de seus parâmetros operacionais e sua eventual degradação”.

A norma S9081-AB-GIB-010 (2007) da marinha americana faz ponderações, onde explica a eficácia do emprego da preditiva baseado em seu comportamento até a falha aleatórios. NASA (2019) diz que “os objetivos ao monitorar a condição do equipamento são determinar a condição do equipamento e desenvolver uma tendência com a qual prevê a condição futura do equipamento”.

Houve grandes avanços nas técnicas de preditiva nas últimas duas décadas, motivado por novas tecnologias computacionais e a crescente demanda de aplicação (SMITH e HINCHCLIFFE, 2004; MOUBRAY, 2000). A particularidade é que geralmente são executadas com o equipamento funcionando o que contribui para disponibilidade para o sistema (KARDEC e NASCIF, 2019). As principais técnicas de preditiva: análise de vibração, ultrassom, análise de óleo, termográfica e medição de espessuras.

### **2.3.4 - Manutenção detectiva**

Criada devido o aumento da complexidade dos equipamentos, pertence a modalidade default de tarefas e atua para detectar falhas ocultas, em sistemas de proteção de equipamentos, de monitoramento e controle. KARDEC e NASCIF (2019)

explica com o avanço e emprego cada vez maior da tecnologia computacional, a segurança dos equipamentos e processos físicos passam a ter maior dependência do controle e monitoramento dessas arquiteturas computacionais. Por exemplo, falhas e erros em programas numa rede de controle fabril podem ser descobertos somente após ocorrer um acidente, por isso a importância de uma simulação, controlada, de emergência real verificando na prática se o sistema vai agir conforme projetado.

### **2.3.5 - Engenharia de manutenção**

É alocada na modalidade *default* pelo autores e área acadêmica, a engenharia de manutenção existe em uma organização para “perseguir benchmarking, aplicar técnicas modernas, estar nivelado com a manutenção de primeiro mundo” (KARDEC e NASCIF, 2019). Tem a função também de criticar e suportar as estratégias de operação e manutenção desenvolvimento das melhores práticas operacionais. Segundo a NBR 55000 (2014) a engenharia está presente em todo ciclo de vida do ativo, do projeto básico até seu descarte, atuando em cada fase desse ciclo de forma estratégica como responsável técnico. Na fase de seleção das tarefas SIQUEIRA (2014) pondera que ela é responsável por toda análise técnica, principalmente quando requer mudança de projetos ou a decisão de operação até a falha, caso seja preventiva deve definir as frequências o passo a passo.

## **2.4 - GESTÃO DE ATIVOS**

A gestão de ativos é apresentada na norma europeia PAS-55 (2004), como resultado de um estudo em parceria com empresas de vários setores, buscando um entendimento comum relacionado a gestão de ativos, sendo atualizada pela PAS-55 (2008) e, posteriormente pela NBR 55000 (2014). Estas normas e autores com KARDEC e NASCIF (2019) explicam que a gestão de ativos não é uma metodologia com passo a passo, mas sim um sistema coordenado, uma filosofia, um caminho para empresas extraírem a excelência de seus ativos.

A gestão de ativos surge da necessidade de um olhar mais amplo em todo ciclo de um ativo<sup>3</sup>, ou seja, do projeto básico até seu descarte, conectando de forma

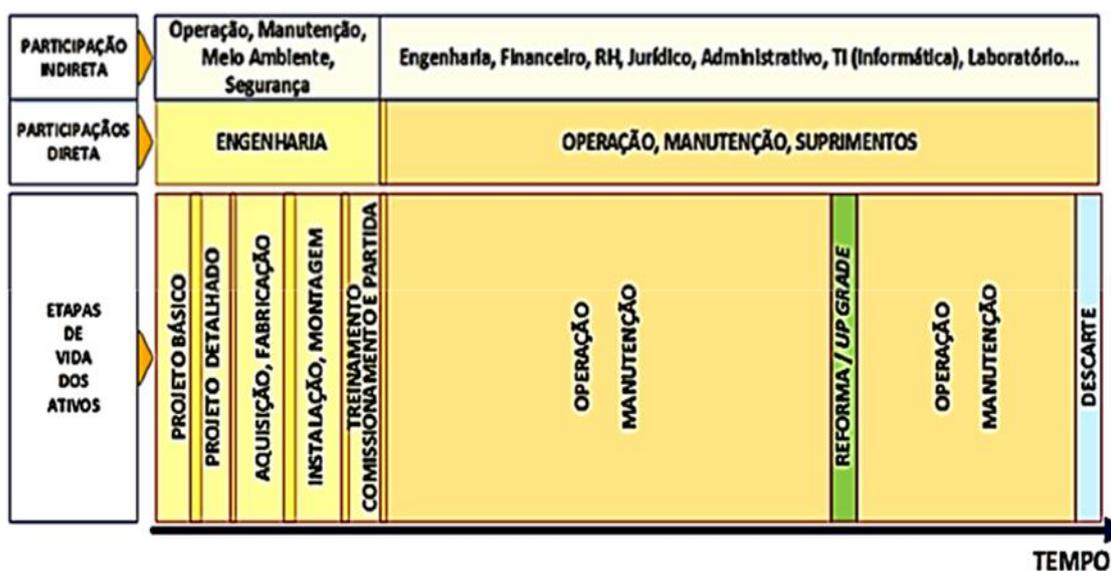
---

<sup>3</sup> Ativo - um item, coisa ou entidade que tem valor real ou potencial para uma organização (NBR 5500 2014).

coordenada os processos e todos *stakeholders*<sup>4</sup> diretos e indiretos com a finalidade de prover intensa sinergia em prol dos resultados e objetivos da companhia (NBR 55000, 2014; KARDEC e NASCIF, 2019). PERRERIA (2016) reforça as fases desse sistema e a importância do modelo conceitual e suas contribuições no planejamento estratégico e tomada de decisões sendo a gestão de ativos “o tratamento dado sobre os ativos físicos, utilizados para suportar a tomada de decisões, a priorização de investimentos, a determinação de manutenção ideal dos ativos e a frequência de renovação dos mesmos”. Englobando todo ciclo de vida deste ativo, ou seja, do seu projeto a sua desativação.

De acordo com a NBR (55000/2014) a gestão de ativo baseia seu conceito no equilíbrio entre o “custo, os riscos e a disponibilidade”. A Tabela 2.2 abaixo mostra todo as fases do ciclo de vida de um ativo e todas as partes envolvidas, com isso é possível perceber a amplitude de responsabilidades perpassando das camadas operacionais como operação e manutenção até áreas corporativas como Recursos Humanos e financeiro.

Tabela 2.2 - Fases e stakeholders diretos e indiretos da gestão de ativos.



Fonte: NASCIF (2012)<sup>5</sup>.

COELHO (2016) diz que a estratégia das empresas sempre estará em rota de colisão devido a fatores interno concorrentes, e essas escolhas por muitas vezes serão

<sup>4</sup> Stakeholders termo do filósofo Robert Edward Freeman definiu a palavra **stakeholder** como os grupos que podiam afetar ou serem afetados pelos objetivos da organização (<https://www.dicionariofinanceiro.com/o-que-sao-stakeholders/>).

<sup>5</sup> Disponível em <https://docplayer.com.br/9980819-Manutencao-e-gestao-de-ativos.html>, Acesso em: 10 de maio de 2020.

binárias, a depender de todo um contexto empresarial. Alguns desses conflitos, de acordo com o autor, são a escolha de “benefícios a curto prazo *versus* os benefícios a longo prazo, despesas *versus* níveis de desempenho, disponibilidade planejada *versus* não planejada ou os custos de capital *versus* as despesas operacionais” (COELHO, 2016).

O gráfico representado na Figura 2.1 apresenta situações típicas deparadas pelas empresas no que tange a escolha da estratégia a ser seguida, onde tem a necessidade de pondera custos, disponibilidade e riscos. O gráfico é conjunto de componentes com desgaste ao longo do tempo, tem o eixo x particionado em intervalos iguais de troca e no eixo Y custos.

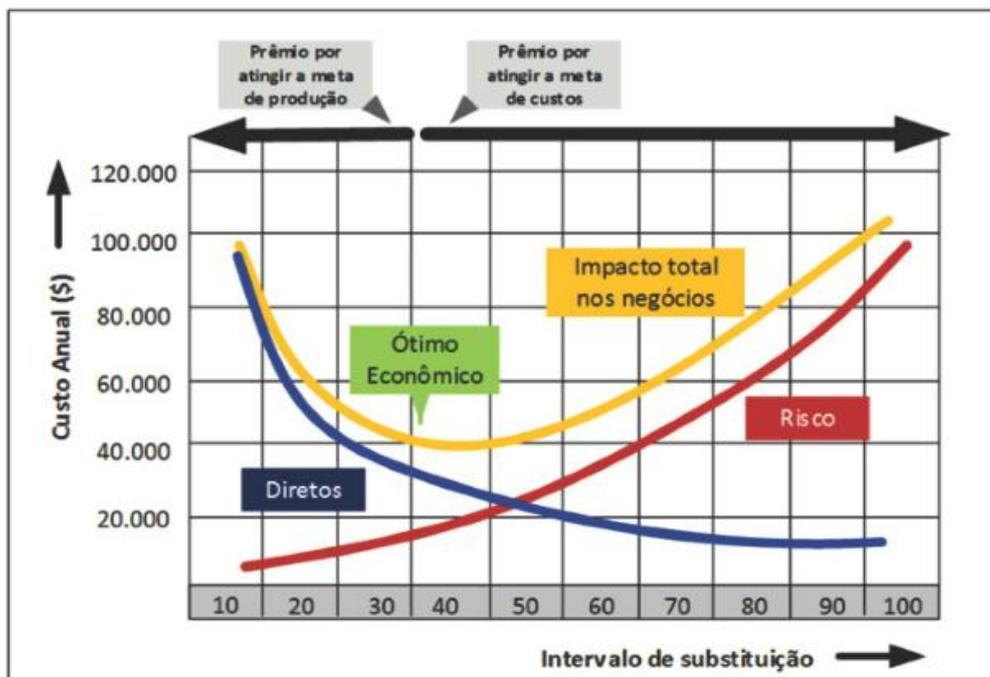


Figura 2.1 - Análise quantificada de desempenho, custo e risco.  
Fonte: KARDEC E NASCIF (2014).

O gráfico é explicado por KARDEC e NASCIF (2009) demonstrando duas situações: a primeira ocorre caso obedeça ao critério de troca em períodos particionados, neste caso os riscos, representados pela curva vermelha, são baixos e consequentemente terá uma alta confiabilidade devido ao baixo impacto na produção. Porém como efeito, o custo, demonstrado pela curva azul, sobe muito toda vez que é substituído um item.

A segunda situação ocorre caso seja decidido estender o período de troca. Neste caso à medida que se caminha ao longo do eixo x os riscos de falhas sobem

abruptamente, conseqüentemente haverá uma confiabilidade mais baixa afetando a produção. Entretanto, ao contrário da primeira situação, os custos serão mais baixos.

E por fim, tem-se a junção dos dois gráficos, representados pela curva amarela, mostrando claramente o ponto ótimo entre os intervalos 30-40 e pontua que intervenções antes desse intervalo leva a um maior custo, porém baixo risco de falhas e conseqüentemente uma maior confiabilidade. Já após esse intervalo tem-se um aumento dos riscos de falhas, bem como impactos operacionais maiores.

A partir disso, tem-se uma visão geral da gestão de ativos num processo decisório feita através dos elementos riscos, disponibilidade e custo, deixando nítido a existência de conseqüências para toda decisão, sendo a melhor decisão um conjunto particular de variáveis de cada empresa e seu negócio.

## 2.5 - A SITUAÇÃO DA MANUTENÇÃO

No Brasil há poucos estudos reconhecidos e atualizados sobre a atual conjuntura da manutenção. Um estudo referência é o realizado em 2013 pela ABRAMAM e apresentado no 28º Encontro Brasileiro de Manutenção e Gestão de Ativos que contextualizou como a manutenção brasileira estava estruturada.

Foram levantados dados como o peso médio da manutenção na receita bruta da empresa, percentual de aplicação por tarefa de manutenção, mão de obra própria e terceira, rotatividade, metodologias aplicadas, dentre outros. Alguns desses dados serão vistos adiante.

O primeiro dado é representado na Tabela 2.3 e diz respeito a aplicação de metodologias para obtenção de uma qualidade e resultados na manutenção. Primeiramente é constatado o crescimento significativo entre os anos de 1997 até 2003, porém com uma estagnação de crescimento a partir de 2004 em todas as metodologias.

Tabela 2.3 - Ferramentas utilizadas para promover a qualidade.

Ano	MCC	5S	FMEA	RCFA	CCQ	TPM (MPT)	6 Sigma	Outros
2013	19,25	23,26	16,31	17,91	-	12,83	10,43	0,00
2011	17,03	27,86	17,34	15,79	-	12,69	9,29	0,00
2009	16,48	28,74	14,94	16,09	-	13,03	10,73	0,00
2007	18,65	27,22	22,02	17,13	-	10,09	0,92	3,98
2005	15,20	41,18	-	-	10,78	15,69	7,35	9,80
2003	20,31	37,50	-	-	8,33	16,15	5,73	11,98
2001	17,35	37,90	-	-	11,42	14,61	-	18,72
1999	5,62	40,45	-	-	16,29	20,79	-	16,85
1997	2,89	46,24	-	-	12,14	18,50	-	20,23
1995	-	39,83	-	-	17,37	21,61	-	21,19

Fonte: SEMINÁRIO ABRAMAN (2013).

Já a Tabela 2.4 de forma geral demonstra uma estagnação nas tarefas de manutenção de 1997 a 2013, mostrando na tarefa preventiva flutuações para cima e para baixo, mas sem muita expressão significativa de valor.

Tabela 2.4 - Aplicação em percentual das tarefas de manutenção.

Ano	Manutenção Corretiva	Manutenção Preventiva	Manutenção Preditiva	Outros
2013	30,86	36,55	18,82	13,77
2011	27,40	37,17	18,51	16,92
2009	26,69	40,41	17,81	15,09
2007	25,61	38,78	17,09	18,51
2005	32,11	39,03	16,48	12,38
2003	29,98	35,49	17,76	16,77
2001	28,05	35,67	18,87	17,41
1999	27,85	35,84	17,17	19,14
1997	25,53	28,75	18,54	27,18
1995	32,80	35,00	18,64	13,56
<b>Hh (serviços de manutenção) / Hh (total de trabalho)</b>				

Fonte: SEMINÁRIO ABRAMAN (2013).

O gráfico a seguir na Figura 2.2 apresenta a média dos custos da manutenção na receita bruta da empresa, porém quando estratificado por setor a variação gira de 1% no setor predial a 10% no setor de logística segundo ABRAMAN (2011).

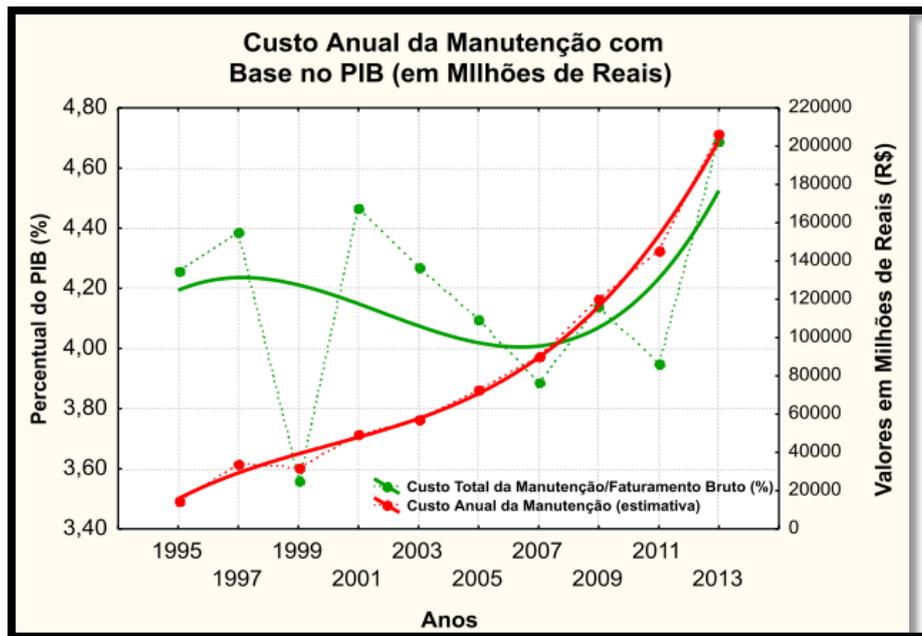


Figura 2.2 - Custo anual de manutenção em relação à receita bruta.  
 Fonte: ABRAMAN (2013).

Autores como SMITH e HINCHCLIFFE (2004) e MOUBRAY (2000) defendem, dentro do contexto estratégico e especificidades dos equipamentos da empresa, a maximização da aplicação de tarefas baseadas na condição como a preditiva. A primeira razão é o aumento da complexidade dos equipamentos alterando o comportamento das falhas e em grande parte a tarefa por preventiva não é eficaz visto que a falha sai de um comportamento exclusivamente por desgaste ao longo do tempo (de 1940 a 1980) para uma predominância de comportamento aleatório (a partir de 1980).

A segunda questão é, com a ineficácia da manutenção preventiva nas falhas com comportamento aleatório, haverá mais o uso da manutenção corretiva. Como se pode observar na Figura 2.3, abaixo, o gráfico exhibe manutenções corretivas como as que possuem os custos mais elevados, além disso, quando ocorre a parada inesperada da planta afeta também a produção e, SMITH e HINCHCLIFFE (2004) acrescentam o fato da qualidade da intervenção ser muito baixa, o que remete a novas falhas repetitivas.

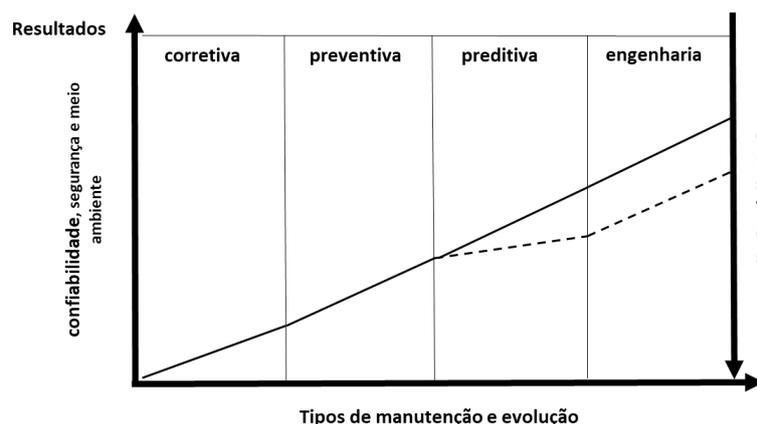


Figura 2.3 - Gráfico custos x disponibilidade por tarefa de manutenção.  
 Fonte: KARDEC e NASCIF (2009).

Esses dados sintetizados, levam há algumas constatações em relação à situação atual da manutenção no Brasil, porque pela complexidade cada vez maior dos equipamentos e diretamente das falhas, esperava-se uma sequência crescente na curva das tarefa de preditiva e como consequencia uma curva descendente nas tarefas por corretiva e preventiva.

SMITH e HINCHCLIFFE (2004) explicam que o motivo principal é porque as empresas de fato operam no modo reativo, privilegiando as manutenções corretivas e preventivas desnecessárias e conservadoras. LAFRAIA (2001) acrescenta a prática de baseiar-se nas recomendações altamente conservadoras dos fabricantes que não consideram o contexto operacional onde o equipamento está instalado, margem exarcebada de segurança ou mesmo por questões comerciais.

MOUBRAY (2000) comenta a prática de tomar decisões sobre o gerenciamento da manutenção com base na experiência dos empregados, que por vezes deixa de lado o ponto ótimo entre os custos, disponibilidade e riscos. RIBEIRO (2009) diz que essas escolhas atreladas à experiência são baseadas em mitos como: “revisão para todos os males”, “item igual manutenção igual”, “quanto mais, melhor”, “é melhor não mudar”, “o fornecedor é quem manda”, etc.

## 2.6 - CONFIABILIDADE

Segundo o DICIONÁRIO AURÉLIO (online) confiabilidade está associada ao “grau de confiança”. Neste caso pode-se associar esse termo a um determinado

equipamento com a seguinte pergunta: qual o grau de confiança deste equipamento? Dessa forma, segue abaixo conceitos de confiabilidade num contexto operacional.

A ABNT 5462 (1994) define confiabilidade como sendo “ a capacidade de um item desempenhar sua função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”. NOWLAN e HEAP (1978) atrelam o conceito de confiabilidade a um equipamento dizendo que “ é o nível de confiabilidade alcançado com um programa de manutenção eficaz”. LEWIS (1996) define como “a capacidade de um sistema ou componente funcionar sob condições determinadas por um período de tempo especificado”, sendo a confiabilidade dividida sobre dois aspectos ou abordagens que são: qualitativa e quantitativa.

### **2.6.1 - Abordagem quantitativa**

FLOGLIATO e RIBEIRO (2009) falam que é “necessária uma definição quantitativa de confiabilidade, em termos de probabilidade”. A probabilidade estuda o grau de aleatoriedade e incerteza da observação de um determinado fenômeno num determinado intervalo de tempo (DEVORE, 2006). É expressa no intervalo de tempo de 0 a 1, onde 1 traduz que o evento vai ocorrer e 0 traduz que não irá ocorrer, ou seja, “uma medida numérica que varia de 0 a 1, ou entre 0% e 100%” (KARDEC e NASCIF, 2009).

FONSECA (2011) fala sobre a dificuldade de prever um resultado futuro da somatória de observações de um mesmo fenômeno, independente que esse seja coletado nas mesmas circunstâncias. DEVORE (2006) fala sobre a importância da probabilidade e da análise desses fenômenos afirmando que “sem incertezas ou variações, haveria pouca necessidade de estatísticos ou métodos estatísticos. Se cada componente de um determinado tipo tivesse exatamente o mesmo tempo de vida”. Ou seja, seja se um mesmo componente falhasse na mesma frequência da mesma forma.

MOBLEY, HIGGINS e WIKOFF (2008) dizem que apesar das empresas desejarem ter seus equipamentos sem falhas, isso não é uma realidade, porque os equipamentos falham e afetam o produto e o negócio. BECK (1999) comenta a necessidade de reunir todos os elementos em uma só representatividade denominado modelagem, que é “representar um problema real através de modelos físicos e matemáticos”. OLIVEIRA (2002) pontua a necessidade de um alto esclarecimento

sobre as bases de dados disponíveis, pois a sua correta interpretação é de suma importância para a escolha do modelo físico e matemático mais adequado.

### **2.6.2 - Abordagem qualitativa**

Para tomada de decisão um número por si só não é o bastante para ter uma referência entre bom ou ruim e tolerável ou intolerável. É preciso categorizar e qualificar todos os elementos em questão. Quando uma falha, por exemplo, tem uma probabilidade de ocorrer a cada 1000 horas de operação, ela deverá vir com todo o enredo subjetivo das suas consequências diretas e indiretas na operação como seus efeitos, gravidade, quais os riscos em relação à segurança, ao meio ambiente, a imagem da empresa, custo, dentre outros.

MOUBRAY (2000) correlaciona os objetivos da manutenção as expectativas de desempenho do equipamento e essas expectativas estão ligadas diretamente ao planejamento estratégico da empresa. Assim a abordagem qualitativa definirá o que será feito, e o aspecto quantitativo auxiliará na escolha frequência. Essas duas abordagens juntas modelaram o ponto ótimo de forma customizada para cada contexto operacional.

Para aplicação da análise qualitativa utiliza-se de ferramentas como FMEA, diagrama de árvore, análise de Pareto, dentre outras. Cabe aqui ressaltar na análise qualitativa a experiência dos profissionais envolvidos tornam peça chave na tomada de decisões, baseados em experiência outrora ou semelhante ocorridas em um determinado equipamento similar.

### **2.6.3 - Função confiabilidade R(t) e densidade de falhas**

Considerando  $N_0$  amostras com as mesmas características e condições, sendo ocorridos dentro do intervalo  $(t - \Delta t, t)$ , onde  $N_f$  são a quantidade de elementos que falharam e  $N_s$  são os elementos que sobreviveram, P representa essa probabilidade ambígua. Esta equação é a função de confiabilidade R(t), transcrevendo a probabilidade de ocorrer ou não um evento em um intervalo de tempo FLOGLIATO e RIBEIRO (2009). É usualmente chamada de taxa de sobrevivência, onde:

$$R(t) = P(T \geq t) \quad (2.1)$$

Logo inversamente tem-se a probabilidade do fracasso, ou seja, de uma falha ocorrer é:

$$F(t) = 1 - R(t) \text{ com a condição } t \geq 0 \quad (2.2)$$

Temos após isso, considerando que essas funções acima são deriváveis e contínuas, COLOSIMO e SUELY (2006):

$$F(t) = \int_0^t f(s).ds, t > 0 \quad (2.3)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(s).ds, t > 0 \quad (2.4)$$

#### 2.6.4 - Função de risco h(t)

A função de risco h(t) traduz a probabilidade de uma falha ocorrer em um determinado intervalo segmentado de tempo, como exemplo entre  $[ t_1, t_2 ]$  entendendo que em  $[0, t_1]$  não ocorreu (COLOSIMO e SUELY, 2006; GIOLO, 2006; KECECIOGLU, 2002 *apud* KOMNINAKIS, 2017). FLOGLIATO e RIBEIRO (2009) explicam que a função de risco h(t) também é conhecida como “taxa de falha ou taxa de risco”.

LEEMIS (2009) traduz a função como suscetividade de risco em que um equipamento detém num determinado momento ao longo da sua vida útil, ou seja, desde o início de sua operação até o seu descarte, entendendo a existência de diferentes taxas de falhas ao longo desse período, motivados do próprio envelhecimento do equipamento ou a exposição de diferentes variáveis operacionais. De acordo com FLOGLIATO e RIBEIRO (2009) a equação fica determinada a seguir:

$$R(t) - R(t + \Delta t) \text{ ou } R(t_1) - R(t_2) \quad (2.5)$$

Considerando um evento em um determinado intervalo  $t - \Delta t$  e que  $\Delta t \rightarrow 0$ , logo terá a taxa de risco instantânea ou a função de risco h(t) dada por:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t) \Delta t} = \frac{-R'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}, t \geq 0 \quad (2.6)$$

#### 2.6.5 - Tempo de vida residual L(t)

Como o próprio nome diz é o tempo restante médio até uma falha, entendendo que esta já sobreviveu um tempo t e sua estimativa é até o tempo T, logo a vida residual

média é  $T - t$  representado por  $L(t)$ . Sua equação fica de acordo com FLOGLIATO e RIBEIRO (2009):

$$L(t) = E[T-1, \text{ onde } T \geq t] \text{ e } t \geq 0$$

Ou

$$L(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

Quando  $t = 0$  então a Equação fica:

$$\int_t^{\infty} u \frac{f(u)}{R(t)} - t = \frac{1}{R(t)} \int_t^{\infty} u f(u) du - t \rightarrow t=0 \quad (2.7)$$

### 2.6.6 - Tipos de parâmetros na confiabilidade

Para aplicar um modelo de estatística é necessário entender os tipos de dados a serem trabalhados, quando tem-se uma restrição chamada censura de dados <sup>6</sup>, a aplicação da estatística clássica (técnica de regressão, planejamento de experimentos, análise de variância) não tem eficácia, porque sua aplicação fica condicionada ao conhecimento de todos os resultados postos em teste (COLOSIMO e SUELY, 2006).

Por muitas vezes é inviável ou impossível testar até a falha um conjunto de elementos na sua totalidade por fatores como custo, tempo elevado, impossibilidade de detecção do momento exato da falha, dentre outros. Então onde não é possível utilizar todos os dados amostrais, sendo obtido amostras de um todo, faz-se necessário o uso de estimativas (FLOGLIATO e RIBEIRO, 2009; LEEMIS, 2009). O nome dado a esse tipo de abordagem onde há dados censurados é a função análise de sobrevivência.

Na análise de sobrevivência os resultados são denominados como falhas potenciais, isto porque estas falhas não chegaram a ocorrer. Outro ponto é a consideração da independência estaticamente das amostras, por exemplo ao medir lotes de um determinado produto (FLOGLIATO e RIBEIRO, 2009; LEEMIS 2009).

Nesse sentido, os métodos apresentados a seguir são os mais adequados e difundidos para o trabalho com esse tipo de dados de uma função de sobrevivência. KOMNINAKIS (2017) afirma que “o principal componente na análise descritiva de dados de tempo de vida é a função sobrevivência, então o passo inicial é encontrar uma estimativa para a função de sobrevivência e então, a partir dela, estimar as estatísticas de interesse”. Neste sentido torna-se de suma importância para o conhecimento e aplicação

---

<sup>6</sup> Censura de Dados: “Um conjunto de dados incompletos de tempos até falha é dito **censurado** ou **truncado**” (FLOGLIATO e RIBEIRO, 2009).

das funções o exercício supracitado acima pelo autor entendendo como necessidade de conhecimento as médias entre falhas, períodos e duração das falhas fixo ou variável e com tabulação de dados bem definidas.

### 2.6.7 - Distribuição exponencial

Segundo COLOSIMO e SUELY (2006) a distribuição exponencial é umas das mais usadas para obter a descrição até a falha, como a única ter uma função de risco constante. Uma característica é que “supõem-se unidades com uma mesma confiabilidade  $R(t)$  para qualquer  $t$ , independente de sua idade ou tempo de uso”, implicando sua aplicabilidade para itens onde há uma taxa de falha relativamente constante (FLOGLIATO e RIBEIRO, 2009). A equação é dada segundo DEVORE (2006), com parâmetros  $\lambda$  ( $\lambda > 0$ ) é:

$$f(x; \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} \\ 0, & x \geq 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

FLOGLIATO e RIBEIRO (2009) relacionam com as equações de confiabilidade  $R(t)$ ,  $f(t)$ ,  $h(t)$  e MTBF conforme abaixo:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.9)$$

$$h(t) = \lambda \quad (2.10)$$

$$MTBF = E[T] = \frac{1}{\lambda} \quad (2.11)$$

### 2.6.8 - Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é umas das mais utilizadas quando se trata de engenharia de confiabilidade e funções constantes, isso se deve a sua versatilidade e simplicidade para a aplicação, com resultantes bem aproximadas. A equação geral é dada por:

$$f(t) = \frac{y}{\theta^y} t^{y-1} \exp \left\{ - \left( \frac{t}{\theta} \right)^y \right\} \quad (2.12)$$

Tempo até a falha é  $t$ , e  $\lambda$  definido de 0 a  $\infty$ , sendo que o  $\gamma$  que determina o parâmetro da curva e  $\theta$  a sua escala. Ademais segue abaixo a inclusão das medidas de confiabilidade dentro da distribuição de Weibull segundo FLOGLIATO e RIBEIRO (2009):

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1} e^{-t^{\gamma}/\theta} \quad (2.13)$$

$$R(t) = e - \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma} \quad (2.14)$$

$$H(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} \quad (2.15)$$

$$MTTR = \theta \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (2.16)$$

A função de risco inserida na distribuição de Weibull traz resultados bem aproximados do conjunto amostral, independente que estes tenham comportamento distintos, sendo o parâmetro de formatação da curva  $\lambda$  é o coeficiente que mostra três condições em relação a taxa de falha (LEEMIS, 2009; COLOSIMO e SUELY, 2006).

Se  $\lambda < 0$ , logo a taxa de falha terá uma curva decrescente, se  $\lambda = 0$ , logo a taxa de falhas é constante e caso  $\lambda > 1$  então a curva da taxa de falha será crescente. Sobre  $\theta$  é considerado com um parâmetro de escala, porque quando mantém o  $\lambda$  constante e altera-se o valor de  $\theta$ , este por sua vez causa retração ou expansão do gráfico (COLOSIMO e SUELY, 2006).

FLOGLIATO e RIBEIRO (2009) traz duas condições especiais quando  $\lambda = 2$  se torna uma reta com sua inclinação considerada  $\left\{\frac{0}{\theta}\right\}$ , e quando  $\lambda = 3,26$  a distribuição Weibull apresenta uma curva semelhante à curva normal.

### 2.6.9 - Distribuição lognormal

A distribuição lognormal segue a variabilidade de aplicação da distribuição de Weibull. Esta distribuição é aplicada para itens com característica de desgaste ao longo do tempo e para entender o tempo de reparo, supondo uma maior probabilidade de reparo à medida que a idade operacional avança. A equação é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma t}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{(\ln t - \mu)}{\sigma}\right]^2\right\} \quad (2.17)$$

A função densidade lognormal acima considerando  $\mu = 0$ , com as considerações os parâmetros de curva  $\mu$  e desvio padrão  $\theta$ . Com a curva padrão seguindo uma curva da banheira invertida, sua vinculação com tempo de reparo se dá porque elementos complexos em determinado período podem ter um aumento significativo de falha com reparos longos ou curtos e após esse período estabilizar (LEEMIS, 2009; COLOSIMO e SUELY, 2006). As distribuições das funções lognormal, e incorporadas nas funções de confiabilidade  $R(t)$ , de risco  $h(t)$  e  $MTTF$  são:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{u - \ln t}{\sigma}\right) \quad (2.18)$$

$$h = (t) \frac{\left[\frac{\partial \Phi\left(\frac{u - \ln t}{\sigma}\right)}{\partial t}\right]}{\left[\frac{\partial \Phi\left(\frac{u - \ln t}{\sigma}\right)}{\partial t}\right]} \quad (2.19)$$

$$MTTF = e^{(u + \sigma^2)/2} \quad (2.20)$$

Sendo que,  $\Phi$  relativiza a função destruição normal padronizada, entendendo o fator  $\Phi$  como parâmetro em  $x$ . É uma equação essencialmente centrada em  $\mu$ . FLOGLIATO e RIBEIRO (2009) comentam que sua mediana  $R(\tau m) = 0,5$  a partir de  $\tau m = \epsilon \mu$ .

## 2.7 - FALHAS FUNCIONAIS

Segundo o dicionário Aurélio (on-line) falha significa “defeito, ausência de perfeição; em que há erro, incorreção; falha de desenvolvimento”. A NBR 5462 (1994) define falha como “término da capacidade de um item desempenhar a função requerida”. Então, muito mais do que entender a falha, é entender de que forma esta afeta o sistema, ou a função do equipamento onde ocorre” (MOUBRAY, 2000).

Fica notório o quão indesejável é a ocorrência de falhas, ademais é necessário relativizar as falhas e suas consequências. Um exemplo comparativo seria uma falha no escape e outra no motor de um carro, isto geraria criticidades e magnitudes distintas, pois a primeira falha não para o veículo, porém e provavelmente a segunda irá paralisá-lo. Ainda poderíamos estender e comparar essas mesmas falhas a um automóvel de passeio e uma ambulância, o que remete a diferentes tolerâncias (MOUBRAY, 2000; SLACK, 2018).

Segundo SLACK (2018) as falhas podem ter origem em diferentes fases de um projeto fabril, pode ser oriunda do “projeto, instalação, pessoal, fornecedores, clientes e

rupturas do ambiente”, então, faz-se necessário entender o comportamento e probabilidade da falha ocorrer, sendo uma das formas é através da “curva da banheira” dividida em três comportamentos distintos o primeiro é mortalidade infantil, a segunda é vida normal e a terceira é desgaste representados pelo gráfico na Figura 2.4.

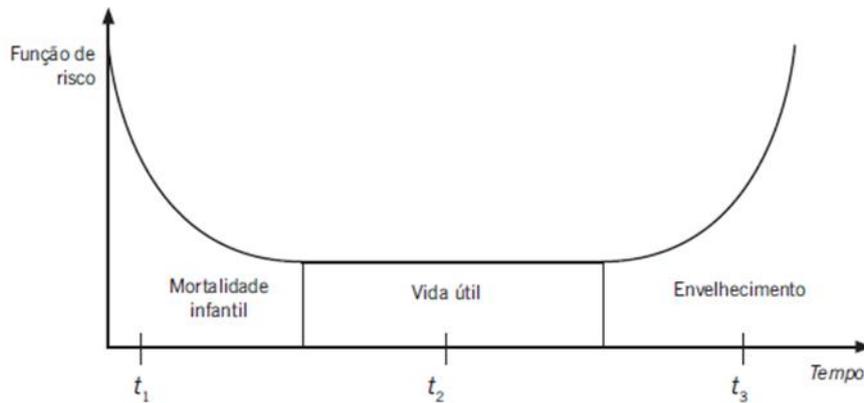


Figura 2.4 - Gráfico modelos de falha curva da banheira.  
Fonte: FLOGLIATO e RIBEIRO (2009)

O gráfico apresentado na Figura 2.4 apresenta três comportamentos distintos ao longo do tempo e este foi o primeiro gráfico a ser utilizado para representar a vida útil de um componente, caracterizando uma alta volatilidade de falhas iniciais o que pode também indicar ineficiência no controle de qualidade, seguindo para fase de taxa constantes e falhas aleatórias e por fim aumento exponencial da taxa de falha caracterizada pelo fim de vida útil do componente. As características mais detalhadas de cada etapa estão dispostas a seguir:

- Mortalidade infantil – falhas ocorridas logo no início do ciclo de um componente, com curva de tendência exponencial decrescente. Falhas como esta podem ocorrer por erro no projeto, nos setups iniciais, na qualidade do material;
- Vida normal – caracterizada por uma taxa constante e baixo número de falhas, geralmente causados por fatores aleatórios durante seu estágio operacional. Estes fatores geralmente estão associados à operação inadequada, qualidade da manutenção e a característica dos equipamentos carregados de automação e eletrônica. Em linhas gerais, está diretamente ligada na gestão do ativo e característica dos equipamentos;
- Desgaste – é caracterizada pelo aumento exponencial da taxa de falha devido à proximidade do fim de vida útil desse componente, ou seja, o desgaste natural ao longo do tempo, sendo excluído o fator obsoleto segundo SELBITTO (2005).

Porém, este modelo não representa mais o comportamento absoluto das falhas devido aos avanços tecnológicos dos equipamentos transformando-os em sistemas complexos onde as falhas começam a ter um novo tipo de comportamento predominante. Estes comportamentos foram verificados à medida que a engenharia de confiabilidade também se desenvolveu com análises mais aprofundadas através de métodos e estatística aplicada (MOUBRAY, 2000; SMITH e HINCHCLIFFE, 2004; KARDEC e NASCIF, 2009).

SMITH e HINCHCLIFFE, (2004) sustentam um resultado estatístico fidedigno a uma porção amostral robusta com dados históricos fiéis. O primeiro trabalho com essa envergadura surge em meados da década de 60, na aviação, onde necessitou de um estudo aprofundado para a homologação do primeiro avião a jato comercial: o Boing 747. KARDEC e NASCIF (2009) dizem que esses resultados apresentados da United Airlines foi uma compilação amostral de 30 anos e estão representados pelo gráfico na Figura 2.5, a seguir.

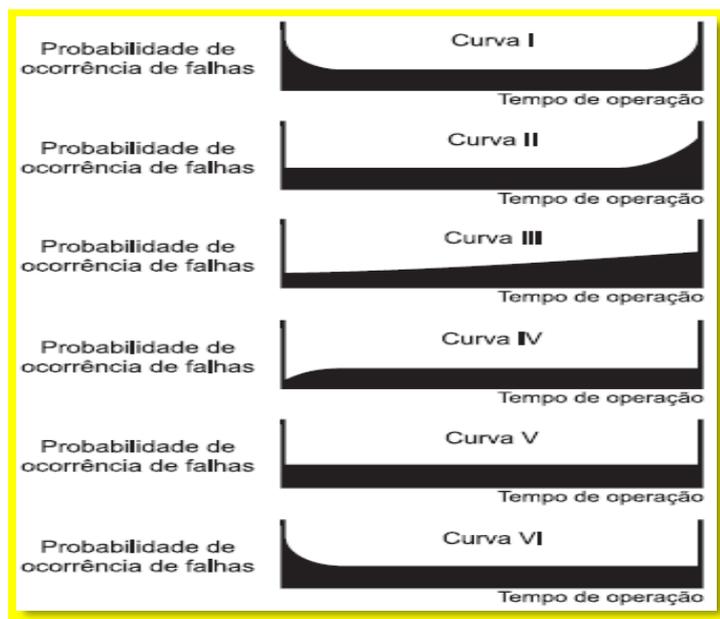


Figura 2.5 - Gráfico característica das falhas de um componente.  
 Fonte: SMITH e HINCHCLIFFE (2004)

Os resultados desse estudo comprovaram a existência de diferentes comportamento das falhas, tornando a “curva da banheira” inespreável, com cerca de 11% das ocorrências. Do outro lado, com aproximadamente 89%, estão as falhas aleatórias traduzindo a imprevisibilidade ao longo do tempo e excluindo uma curva exponencial de taxa de falha por final da vida útil do componente, ou seja, em 89% das

falhas ocorridas a aplicação de manutenções baseadas em tempo não surtiriam efeitos eficazes, por muitas vezes os efeitos colaterais seriam maior que os benefícios, pois você inclui a probabilidade de erro humano, operacional ou qualidade nas intervenções (SMITH e HINCHCLIFFE, 2004; SIQUEIRA, 2014; KARDEC e NASCIF, 2009).

## CAPÍTULO 3

### MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE – MCC

Antes de seguir com a elucidação da metodologia MCC para *verificação experimental* da hipótese aqui apresentada é importante expor que este trabalho “trata-se da comunicação dos resultados de uma pesquisa e de uma reflexão, que versa sobre um tema igualmente único e delimitado.” (SEVERINO, 2013). Sendo, portanto, um trabalho científico, adotando determinados recursos técnicos.

#### 3.1 - TÉCNICAS E MÉTODOS DE PESQUISA

Tendo por referência a natureza das fontes utilizadas, este trabalho adota a pesquisa bibliográfica, análise documental e pesquisa de campo. Tais métodos serão brevemente descritos abaixo, e diferem da metodologia de MCC, pois o MCC é um método/técnica aplicada em sistemas/maquinários operacionais, sendo enquadrado na metodologia de análise de dados.

##### 3.1.1 - Pesquisa bibliográfica

Considerando a pesquisa bibliográfica como aquela que “se realiza a partir do registro disponível, decorrente de pesquisas anteriores, em documentos impressos, como livros, artigos, teses etc.” (SEVERINO, 2013), e que dados ou categorias já foram trabalhadas, utilizamos autores como SIQUEIRA (2009), MOUBRAY (2000), KARDEC e NASCIF (2018), além de normas regentes como NAVAL SEA SYSTEMS COMMAND (2006) e o precursor NOWLAN E HEAP (1978), nas categorias principais de manutenção e confiabilidade para este trabalho.

##### 3.1.2 - Pesquisa documental

Este trabalho apresenta também análise documental, considerando documentos no “sentido amplo, ou seja, não só de documentos impressos, mas sobretudo de outros tipos de documentos, tais como jornais, fotos, filmes, gravações, documentos legais.” (SEVERINO, 2013), como, por exemplo, normas, como a ISO 5462 (1994),

questionários de metodologias MCC, apostilas de fabricantes, livros técnicos. Alguns desses documentos terão tratamento analítico específico.

### 3.1.3 - Pesquisa de campo

Considerando que dados foram coletados diretamente do ambiente a ser analisado, ou seja, do ambiente do descarregador de vagões, fez-se uso da pesquisa de campo, cuja “coleta dos dados é feita nas condições naturais em que os fenômenos ocorrem, sendo assim diretamente observados, sem intervenção e manuseio por parte do pesquisador.” (SEVERINO, 2013).

Para tal, foi-se a campo observar as intervenções de manutenção programadas para os equipamentos em estudo verificando as técnicas utilizadas, bem como todo o ambiente e mão de obra. Fora isso, também se foi a campo para observar o comportamento dos equipamentos em operação conferindo sua dinâmica de funcionamento e demais condições inerentes à pesquisa, à luz da metodologia MCC e a manuais de manutenção em componentes e serão apresentadas nos próximos capítulos com conceitos do MCC (seção 3.2) e apresentação e análise dos dados (seção 4).

## 3.2 - TEORIAS E CONCEITOS

O MCC surgiu em 1978 através do estudo para homologação do BOING 747 pelo departamento de defesa dos Estados Unidos da América, baseado no relatório dos percusores Nowan e Heap segundo SAE JA1011 (1999). A metodologia foi denominada de *RCM (Reliability Centered Maintenance)*, e este estudo adota o termo largamente utilizado no Brasil, a tradução, que é MCC - Manutenção Centrada na Confiabilidade.

O propósito do MCC é definido pela SAE JA1011(1999) como sendo “um processo específico utilizado para identificar as políticas que devem ser implementadas para gerenciar as formas de falhas que podem causar falhas funcionais em qualquer ativo físico em um determinado contexto operacional”.

Ou seja, através do estudo qualitativo e quantitativo conceitua a aplicabilidade da política de manutenção mais adequada (corretiva, preventiva, preditiva, detectiva e engenharia de manutenção). MOUBRAY (2000) acrescenta a questão de “onde e como o ativo está sendo usado” que nada mais é do que “contexto operacional”, isso quer

dizer que um mesmo equipamento instalado em locais e condições diferentes, responderá com performance distinta, pois clima, exigência operacional, qualidade de mão de obra, etc., revela alta influência na confiabilidade de um ativo ou componente.

Dito isso, toda a metodologia MMC busca responder sete questionamentos, e na sua ordem descrita, sem saltos, de acordo com NOWAN (1978), MOUBRAY (2000), SIQUEIRA (2014), KARDEC e NASCIF (2019) e SAE JA1011(2009), são:

- Quais são as funções e padrões desempenho associados, desejados, de desempenho do ativo na(s) função(ões) operacional(is) em seu contexto atual?
- De que forma eles podem falhar ao deixar de cumprir suas funções? (falha funcional)
- O que causa cada falha funcional? (modos de falha)
- O que acontece quando ocorre cada falha? (efeitos da falha)
- Qual é a importância de cada falha? (consequências da falha)
- O que deve ser feito para prever ou prevenir cada falha? (tarefas pró-ativas e intervalos das tarefas)
- O que deve ser feito caso uma tarefa pró-ativa adequada não possa ser encontrada? (ações padrão)

A primeira questão é relativa à função requerida, sendo definida como “função ou combinação de funções de um item que são considerados necessárias para prover um dado serviço” ABNT (5462/1994). Todo equipamento tem uma função para o qual foi projetado e um desempenho esperado, sendo que esse desempenho esperado pode ser relativo ao cumprimento da performance operacional, qualidade do produto, segurança, imagem da empresa, custo etc. (MOUBRAY, 2000).

Um sistema pode ser dividido em “N” subsistemas, e cada subsistema é uma função e tem suas peculiaridades afetando a função imediatamente superior de diferentes formas e severidade. Para o sucesso da MCC os sistemas e seus respectivos subsistemas deverão estar claros e definidos (SIQUEIRA, 2014).

No exemplo da Figura 3.1 pode-se observar um equipamento qualquer com uma função principal (saída) e vários subsistemas interligados, que se falharem afetarão a função principal de alguma forma. Deverá observar também se esses subsistemas, por exemplo, trabalham em redundância, em série ou em paralelo para entender seus efeitos e consequências que serão estudados nos capítulos a frente.

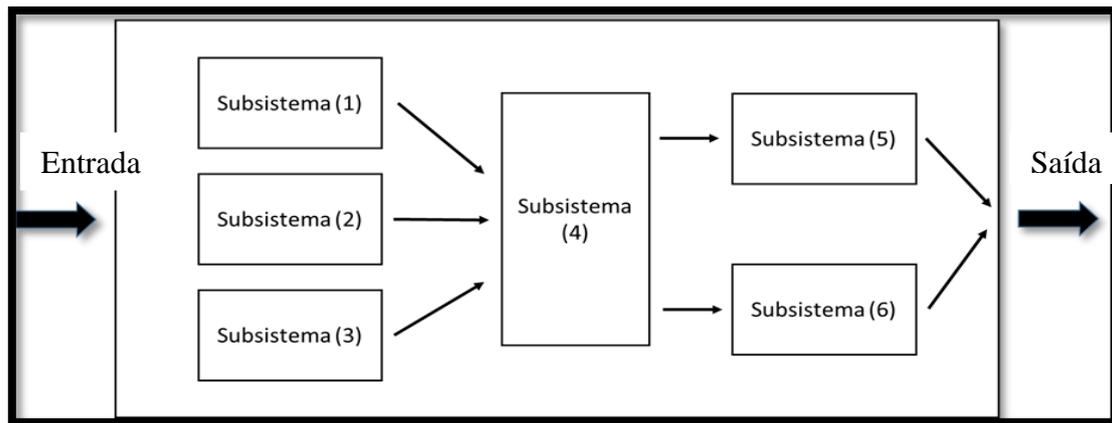


Figura 3.1 - Esquema de função principal e subsistema.

Exemplificando:

- Qual a função do diferencial de um carro? Resposta: transmitir torque e movimento as rodas. Qual a função de um alternador automotivo? Converter energia mecânica em elétrica. E a função secundária do alternador automotivo? Carregar a bateria automotiva do automóvel.

De forma direta, a segunda questão busca identificar as falhas funcionais, que acarretam na perda da função requerida e/ou no desempenho esperado, dessa forma é necessário clarificar como um sistema pode falhar e quais os fatores podem levá-lo a perder sua função (KARDEC e NASCIF, 2019). Falhas funcionais podem ser total, paralisando a função do equipamento ou falha parcial, que afeta na sua performance, ou seja, no desempenho esperado gerando assim restrições.

Exemplificando: Uma falha provável em um rolamento qualquer? Nesse caso poderá ter comprometido seus elementos internos e causar uma falha travando-o impedindo que o mesmo gire e cumpra sua função.

O terceiro questionamento é relativo aos modos de falha, ou seja, eventos com probabilidade de ocorrer e gerar falhas funcionais, estes eventos são levantados baseado no histórico, em equipamentos similares, bem como em eventos com potencial inéditos dado as circunstâncias operacionais (FLOGLIATO e RIBEIRO, 2009). Deve-se também considerar modos de falha oriundos de erro humano advindo tanto da operação quanto da manutenção (MOUBRAY, 2000).

O conceito para modo de falha pode ter conflito de entendimento usualmente confundindo o que é causa e o que é efeito. SAKURADA (2001) trabalhou esse entendimento a partir do significado das palavras em separado, modo e falha, por conseguinte definiu o termo modo de falha sendo “a forma do defeito, maneira na qual o

defeito se apresenta, maneira com que o item falha ou deixa de apresentar o resultado desejado ou esperado”.

Exemplificando: Adotando o mesmo exemplo de um rolamento qualquer, a falha foi o travamento e o modo de falha hipoteticamente poderia ser desgaste dos elementos rodantes. A questão modo de falha será mais aprofundada na quinta questão para aplicação da ferramenta FMEA.

O quarto questionamento diz respeito aos efeitos da falha, ou seja, “o que acontece quando um modo de falha se apresenta” ou também a “forma ou maneira de como o modo de falha se manifesta ou como é percebido em nível de sistema”. MOUBRAY (2000) atenta para o fato que um modo de falha poderá ter mais de um efeito, e SAKURADA (2001) diz que “o modo de falha ocorre internamente, em nível de componentes, subsistemas, gerando efeitos externos”.

Em suma o efeito é um estado ocorrido após a falha, entretanto, é possível que ocorram sintomas de falha que são manifestações predecessora ao efeito. Quando um sintoma surge, conclui que há uma falha suscetível de ocorrer (SIQUEIRA, 2014). Um exemplo simplista seria o aquecimento repentino de um rolamento qualquer, essa manifestação é um sintoma e pressupõe que há algo errado com o rolamento, ficando visível a probabilidade de ocorrer uma futura falha funcional.

Para concluir é necessário um relato fiel com as informações postas de forma clara e objetiva, pois estas informações serão utilizadas para entender quais as consequências dessa falha, tema do próximo questionamento. Segundo SIQUEIRA (2014) deverá avaliar os seguintes aspectos:

- Função → impacto local na função correspondente;
- Sistema → impacto no nível superior ao qual pertence;
- Instalação → efeito na missão da instalação;
- Ambiente → impacto no meio ambiente;
- Segurança → ameaça à segurança pessoal e da instalação;
- Econômico → Qual impacto financeiro que o efeito gera.

As quatro questões anteriores servem como insumo para a assertividade e o discernimento das consequências de cada modo de falha. O impacto é relativo e deve girar em torno do contexto operacional, dos padrões de desempenho em questão, da segurança e meio ambiente e dos efeitos físicos potenciais (MOUBRAY, 2000). É importante nessa etapa a assimilação dos conceitos distintos entre efeitos e consequências de uma falha sendo consequências “o que pode ocorrer com o sistema

quando há a incidência de um modo de falha”, e efeitos é “descrever o que acontece quando uma falha ocorre” CAVALCANT (2011).

NOWLAN e HEAP (1978), dentre outros autores, classificam as consequências das falhas como a etapa mais importante, pois é essa qualificação do impacto o fator determinante para aplicação de medidas e controle adequados, ou seja, é a etapa da pré-decisão. Quanto maior for a gravidade gerada pelos efeitos ocasionados por um modo de falha, maior será o empenho para minimizá-la.

Um ponto importante é clarificar como e onde ocorrem os modos de falha, inclusive como eles afetam o sistema (efeito). Neste sentido, SAKURADA (2001) resume de forma simples e objetiva essa questão entendendo que “um modo de falha é uma anomalia que ocorre em nível de componente e um efeito ocorre em nível de sistema”. Esta anomalia deve ser caracterizada em termos de função ou especificações de projeto, processo ou uso.

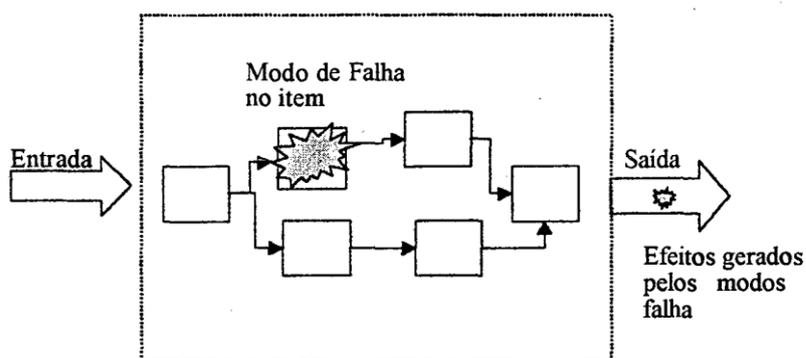


Figura 3.2 - Demonstrativo de uma falha em componente afetando o sistema.  
Fonte: SAKURADA (2001).

A ferramenta mais utilizada para a qualificação da consequência da falha é o FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) que significa *análise de causas e efeitos de um modo de falha*. Sua função é categorizar todos modos de falha potenciais de um sistema e, por conseguinte, descrever seus efeitos e consequências (SAE J1739, 2021). O FMEA é uma metodologia inclusa dentro da MCC e pode ser usada de forma independente para modelamento de problemas envolvendo falhas, com propósito de fornecer soluções de problemas de ordem técnica ligadas direto a causa, já o MCC vai além, com análises qualitativa e quantitativa, propondo uma política de manutenção a um determinado ativo.

Um problema para implantar políticas de manutenção é estimar a confiabilidade do componente ou subsistema mediante a carência de dados sólidos e confiáveis,

principalmente no que tange a novos projetos, dessa forma a MCC estruturou sua narrativa de decisão, buscando não mais pela confiabilidade de um item e sim pela consequência da falha, caso uma falha ocorra. Então busca-se entender a gravidade dessa falha, se ela será tolerável ou intolerável para o contexto operacional onde o equipamento está inserido (NOWLAN e HEAP, 1978).

Neste contexto, a MCC prevalece a questão segurança e meio ambiente ante a custo, com foco nos riscos intoleráveis operacionais e de custo (MOUBRAY, 2001). A ferramenta FMEA qualifica e quantifica esse fator risco analisando cada modo de falha do sistema e subsistemas, estratificando seus modos de falha e o seu grau de risco.

Existem vários leiautes e variações do FMEA, sendo a oficial homologada por Aladon Ltda., já na década de 80<sup>7</sup>. Com o avanço dos softwares, o FMEA é, em geral, feito de forma eletrônica através de softwares especializado. Abaixo segue uma planilha padrão proposta por NUNES (2001) e ZAIONS (2003) para ter um conhecimento da organização dos dados e como é extraído a análise qualitativa. Nessa dissertação serão criadas as próprias planilhas com base nas particularidades encontradas.

Tabela 3.1 - Planilha de organização dos dados para análise de FMEA.

<b>MCC</b>	<b>PLANILHA DE ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHAS</b>									
	SISTEMA			Sistema N <sup>o</sup>	Equipe	Data	Folha N <sup>o</sup>			
	(01)									
	SUBSISTEMA			Subsistema N <sup>o</sup>	Analista	Data	de			
Equipamento	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeitos da Falha	Consequências da Falha	Fatores				
(02)	(03)	(04)	(05)	(06)	(07)	S	O	D	R	
						(08)	(09)	(10)	(11)	

Fonte: ZAIONS (2013)

O FMEA refere-se ao tratamento dado a um sistema, por conseguinte é dividido por subsistema conforme cabeçalho (01). No cabeçalho também temos a identificação padrão exigida para controle com números e nome do sistema, subsistema, equipe, analista, data, folha. Nas colunas de 02 a 06 identifica-se por ordem o equipamento,

<sup>7</sup> Disponível em: 80 <https://industria hoje.com.br/fmea>, acesso maio, 2020.

função, modo de falha, causa da falha e efeito da falha. A coluna (07) é a consequência da falha que é definida pelo produto dos índices das colunas de (08 a 11) que geram um fator de consequência, sendo:

- Coluna 8, refere-se ao índice de severidade (S) da falha no sistema, neste caso analisa o impacto em todo o sistema tanto interno como externo;
- A Coluna 9, refere-se ao índice de ocorrência das falhas (O), esse índice é baseado em estudo estatístico através do histórico ou potenciais;
- A coluna 10, índice que mede o grau de detectibilidade (D), ou seja, se a anomalia é possível ser percebida pelos operadores ou membros da manutenção antes da ocorrência da falha.
- A Coluna 11, é o fator de risco (R) do modo de falha e é esse fator que determinará as ações sobre o modo de falha em questão. Ele é definido pelo produto dos índices (severidade x ocorrência x detectibilidade).

Para qualificar as colunas 8, 9, 10 e 11 é necessário um padrão, uma referência gerando uma escala numérica onde os resultados podem ser comparados. Há diferença do padrão de autor para autor e o grupo de implantação do FMEA pode criar seus próprios parâmetros para ter nexos com o contexto operacional. Abaixo estão dispostas tabelas com propostas de padronização para auxiliar na classificação:

Tabela 3.2 - Tabela para auxílio de preenchimento da severidade.

Valor	SEVERIDADE	DESCRIÇÃO	Ambiental	Pessoal	Custo
5	CATASTRÓFICA	Pode causar mortes, perdas severas de capacidade fabril e perda da função principal e grandes danos ao meio ambiente e elevado custo de reparação.	Grande	Mortal	Total
4	CRÍTICO	Pode causar lesões severas a pessoas, danos na função principal e impacto no meio ambiente médio e médio custo de reparação.	Significante	Grave	Parcial
3	MARGINAL	Ferimentos leves em pessoas, paradas curtas ou restrição na função principal e leve impacto no meio ambiente e baixa custo.	Leve	Leve	Leve
2	MÍNIMA	Sem consequências as pessoas ou meio ambiente, causa restrição em função secundária baixo custo.	Aceitável	Insignificante	Aceitável
1	INSIGNIFICANTE	Sem consequências as pessoas ou meio ambiente, sem perdas operacionais, sem custos.	Inexistente	Inexistente	Inexistente

Fonte: Adaptado de SIQUEIRA (2014).

Tabela 3.3 - Tabela para auxílio de preenchimento de detectibilidade.

Nível	Detectibilidade	Descrição
1	Fácil	Falha detectável por procedimento operacional
2	Razoável	Falha detectável por inspeção operacional
4	Difícil	Falha detectável por ensaio funcional
4	Muito Difícil	Falha detectável apenas com desligamento
5	Impossível	Falha totalmente oculta

Fonte: SIQUEIRA (2014)

Tabela 3.4 - Tabela para auxílio de preenchimento do nível de ocorrência.

Frequencia da Falha	Frequencia de Ocorrências	Índice
<b>Muito Alta</b>	De 1 a 2 falhas semanais	10
<b>Alta</b>	De 1 a 4 falhas mês	7
<b>Moderada</b>	1 falha mês	5
<b>Baixa</b>	1 falha a cada 6 meses	3
<b>Remota</b>	1 falha anual	1

Fonte: Adaptado de LAFRAIA (2001).

Após preenchimento da planilha, é hora de calcular a razão do produto  $S \times O \times D = \text{Risco}$ . De posse dos resultados deverá ser colocado em uma tabela na sequência do maior para o menor. Assim fica definido o nível de criticidade de cada falha dentro do processo.

Um dos pontos de atenção é o alto processamento de informações para produzir o FMEA, quanto maior o número de itens físicos do sistema estudado, maior o tempo de processamento e requer profissionais experientes, multidisciplinares com tempo de dedicação total. Entretanto já foram desenvolvidos *softwares* como o SoftExpert, XFMEA, VDA FMEA, Reliasoft, dentre outros, que auxiliam na construção deste produto com uma interface fácil, cálculos e análises de risco automáticos, análise de probabilidade e estatística, catálogo com uma gama de componentes já com seus

principais modos de falha, além da geração de relatórios para acompanhamento de ações, retroalimentação de dados e resultados<sup>8</sup>.

Em relação ao alto número de informações geradas, adiciona-se o risco de perder o foco no que de fato é essencial, a partir do momento onde tudo tem a mesma prioridade e tudo deve ser tratado. SMITH e HINCHCLIFFE, (2004) ponderam que os recursos são cada vez mais restritos e sugere o foco na regra de Pareto onde 80% dos problemas estão em 20% das causas. A S9081-AB-GIB-010 (2007) reforça dizendo que esses 20% são os modos de falhas predominantes. NUNES (2001) argumenta um empenho e foco nas falhas ocultas atreladas a consequências graves.

Dito isso, é interessante que o grupo responsável pelo projeto conecte os resultados obtidos no FMEA aos objetivos do projeto, sob a penalidade de gastar esforços no que é “tolerável e evidente”. SIQUEIRA (2014) coloca como premissa a utilização de um diagrama de decisão para definir se a função do modo de falha de fato é relevante e deverá seguir para análise de FMEA.

Tabela 3.5 - Lógica de definição para função significante.

Função		Descrição da Função	
Função Principal			
Função Secundária (a)			
Função Secundária (b)			
Questionamento	Funções	Respostas	
		Sim	Não
A perda da função gera efeitos intolerável em segurança e/ou, saúde e/ou meio ambiente ?	Primária		
	Secundária (a)		
	Secundária (b)		
A perda da função gera efeitos intoleráveis na operação e nos ativos?	Primária		
	Secundária (a)		
	Secundária (b)		
A perda da função tem impactos significativo econômico para a empresa?	Primária		
	Secundária (a)		
	Secundária (b)		
Esta função protegida por alguma tarefa existente de manutenção?	Primária		
	Secundária (a)		
	Secundária (b)		
Esta função protegida por algum sistema Standby existente?	Primária		
	Secundária (a)		
	Secundária (b)		

Fonte: Adaptado de SIQUEIRA (2014).

<sup>8</sup> Disponível em: <https://www.reliasoft.com/>, acesso maio, 2020

### **3.2.1 - Seleção, aplicabilidade e frequência de tarefas de manutenção**

Para responder à sexta e a sétima questão, fechando o ciclo da MCC, é necessário obter as tarefas de manutenção a serem implementadas dentro de um contexto de aplicabilidade, frequência e custo. SIQUEIRA (2014) considera quatro critérios para a escolha de uma atividade de manutenção, são eles: ser aplicável tecnicamente, viável economicamente, produzir os resultados desejados e ser executado dentro de um intervalo razoável.

MENDES (2011) traz uma questão importante, pois grande parte os projetos de MCC são qualitativos, e primordialmente as definições de frequência deveriam ser quantitativas, ou seja, apoiadas em análise estatísticas. Entretanto um volume significativo de empresas não possui um banco de dados robusto para que tal análise possa ser realizada.

Um dos fatores são novos equipamentos, onde geralmente não dispõem de dados operacionais e performance real, sendo normal a adoção dos parâmetros dos equipamentos anteriores ou similares como ponto de partida. NOWLAN e HEAP (1978) defende um programa cauteloso e conservador com reavaliações sistemáticas até adquirir uma maturidade dos dados operacionais. CAVALCANTI (2011) indica na ausência de indicadores e dados o uso de valores “absolutos, médio ou criar limites superiores e inferiores”.

Outro fator contribuinte para o viés qualitativo é o uso da experiência das pessoas para definir tarefas e frequência. Estas pessoas estão carregadas de crenças que na maioria das vezes acreditam na substituição de itens baseadas em intervalos fixo como solução, desprezando as curvas de falha e o grau de significância da função para o sistema (LAFRAIA, 2001; RAUSAUND, 1998). Estes autores, além de SMITH e HINCHCLIFFE (2004), KARDEC e NASCIF (2019) ressaltam os riscos de seguir na totalidade as recomendações do fabricante, visto que são tendenciosas do ponto de vista comercial e tem alto conservadorismo.

Diante do exposto, a equipe de implantação da MCC deverá ter o discernimento sobre esse viés qualitativo, indo a favor dos conceitos da gestão de ativos que é o equilíbrio entre custos, riscos e disponibilidade.

### 3.2.1.1 - Perfil da falha

Algumas falhas antes de acontecerem ou mesmo durante o processo da falha, de alguma forma, são percebidas pela equipe de operação ou manutenção. Tais falhas são denominadas de falha evidente. Essa visualização pode ocorrer através de uma inspeção preditiva ou funcional, sinais sonoros de alertas ligados a sensores de monitoramento. Ao contrário, se a falha não é perceptível, são chamadas de falha oculta (MOUBRAY, 2000).

A falha oculta ocorre de forma inesperada, sendo percebida apenas após uma ocorrência. NOWLAN *et al.* (1978) divide em dois tipos de falha oculta, a primeira faz parte de um elemento com função *standby*<sup>9</sup> e a segunda é um elemento com função ativa<sup>10</sup>. Sobre *standby* poderia ser uma válvula de segurança de uma caldeira ou uma bomba d'água reserva para resfriamento de um processo. Sobre função ativa poderia, por exemplo, ser um detector de fumaça de uma subestação.

RIBEIRO (2009) fala que as falhas ocultas estão ligadas a funções secundárias ligadas ao sistema de segurança, monitoramento ou substituição de funções principais que entram em falha. A norma S9081-AB-GIB-010 (2007) fala da necessidade de inspecionar esses dispositivos e elementos, porém ponderando os riscos de imputar defeito ou desgaste no componente ao testar.

Esses equipamentos secundários ao entrar em falha, seja com função *standby* ou ativo, param o monitoramento dos equipamentos da função primária e caso nesse período o equipamento de função primária também entre falha, então denomina-se uma falha múltipla (NOWLAN, 1978). Dessa forma é necessário avaliar as consequências da falha aos componentes da função primária.

Sobre a dinâmica das falhas, RIBEIRO (2014) e MOUBRAY (2000) separam em dois grupos. O primeiro seria das falhas com relação direta com o tempo ou com a vida útil conhecida. O segundo diz respeito a falhas aleatórias, ou seja, que não tem relação com o tempo em operação e sim os aspectos de fabricação, instalação e operacionais.

---

<sup>9</sup> *Standby* – “Em espera; refere-se especialmente ao modo de espera, a algo que está preparado para iniciar suas funções, esperando que outra coisa ou pessoa o acione”. AURELIO (ONLINE)

<sup>10</sup> Função Ativa – Equipamento cuja função é controlar algum tipo de fenômeno, tomando a ação de alertar ou acionar um comando (NOWLAN, 1978).

A falha aleatória pode ocorrer com qualquer componente independente de seus aspectos devido ao cruzamento dos três fatores. Abaixo a exemplificação das possíveis situações:

- Um eixo durante seu processo de fabricação tem a inserção de microtrincas em sua estrutura cristalina devido a erros no cumprimento da curva de resfriamento (fabricação);
- Pás de um exaustor são instaladas com parafusos fora da especificação de torque e com parafusos de resistência inferior (instalação);
- Uma placa eletrônica qualquer está recebendo uma corrente elétrica acima de sua capacidade devido a erros de parametrização dos relés (operação).

### 3.2.1.2 - Característica para aplicação de tarefas

Cada tarefa de manutenção tem suas especificidades e são divididas em programadas e não programadas por SIQUEIRA (2014), já MOUBRAY (2000), que também as divide como tarefas proativas e tarefas default. Sua aplicação efetiva está em função das características da evolução da falha, bem como suas consequências.

A modalidade preventiva ou proativa diz respeito as ações preventivas cujo conceito é intervir antes que ocorra uma falha funcional, estas são divididas em duas modalidades sendo a primeira tarefa preventiva que é subdivida em substituição preventiva e restauração preventiva. Já a segunda modalidade é considerada sob condição, constituídas com a tarefa preditiva e a inspeção funcional.

A modalidade reativa ou *default* é aplicada quando as tarefas da modalidade proativas não têm efeito sobre as falhas funcionais intoleráveis (SIQUEIRA, 2014). Nesse caso há dois gerenciamentos a serem aplicados: o primeiro é aplicar tarefa corretiva deixando rodar até a falha, e o segundo é a mudança de projeto parcial ou total. Os conceitos de cada modalidade estão dispostos na planilha da Tabela 3.6, a seguir.

Tabela 3.6 - Planilha de conceituação de tarefas de manutenção.

Tarefa	Descrição	Aplicabilidade	Evolução da Falha
Serviço Operacional	Consiste no ressuprimento consumíveis na usados na operação normal e outras atividades repetitivas, tais como conservação, lubrificação e limpeza do ambiente destinados a controlar a existência de falhas.	Deve reduzir o processo de deteriorização funcional	Controlável
Inspeção Preditiva	É uma inspeção programada em um item com a finalidade de encontrar sintomas específicos predecessoras a falha como alta temperatura, vibração, descontinuidades em eixos, etc.	Deve ser possível mensura a evolução da falha	Mensurável
Inspeção Funcional	Consiste na verificação programada de um estado funcional de um item, com intuito de averiguar se há uma falha não visível ao operador.	Deve ser possível mensura ou prever um deteriorização de uma falha que não é visível	Invisível
Restauração Preventiva	Consiste na correção programada de desgaste ou desvio de um item em operação em determinada idade limite	Item deve mostrar uma degradação com uma idade conhecida. Uma proporção alta deve sobreviver com essa idade estabelecida	Previsível
Substituição Preventiva	Substituição Programada de um determinado item antes de determinada data limite.	Item deve mostrar uma degradação com uma idade conhecida. Uma proporção alta deve sobreviver com essa idade estabelecida e não pode ser viável a recuperação do item	Previsível
Manutenção Corretiva	Recuperação não programada de um item identificado por alguma tarefa programada	Para situações onde a eminência de uma falha é verificada, fora do intervalo programado de manutenção.	Visível
Reparo Funcional	Recuperação não programada de um item após a perda de sua função, ou seja, após a ocorrência de uma falha	Nenhum anterior consegue prevenir a falha e não oferece risco de segurança nem ao meio ambiente	Incontrolável
Mudança de Projeto	É a alteração no projeto inicial que altere a capacidade e forma de opera como também mudança estrutural	Nenhum item anterior, isolado ou em conjunto consegue prevenir a falha	Incontrolável
Manutenção Combinada	Quando exige a aplicação de duas ou mais tarefas para prevenir uma falha funcional	Nenhum item anterior isoladamente consegue prevenir a falha	

Fonte: Adaptado de SIQUEIRA (2014).

### 3.2.1.3 - Tarefa sob condição

A Figura 3.3 traduz um comportamento de falha evidente com alto nível de detectibilidade. Há uma resistência máxima ao ser colocado em funcionamento (ponto A). Com o tempo esse componente vai degradando constantemente perdendo parte de sua resistência, mas sem danos a sua função (ponto B). Porém, em um ponto à frente esse desgaste é relativamente alto iniciando de forma perceptível uma falha potencial<sup>11</sup> (P). Nesse momento a curva ganha um declive exponencial até chegar à falha funcional (F). Para uma tarefa por condição ser aplicável, o intervalo P-F deve ser suficiente para, no mínimo, uma inspeção após o ponto P e antes do ponto F (NOWLAN *et al.*, 1978; SIQUEIRA, 2014). Entende-se por tarefa de condição:

<sup>11</sup> Falha Potencial: “condição física identificável, que indica uma falha funcional é iminente” S9081-AB-GIB-010 (1983)

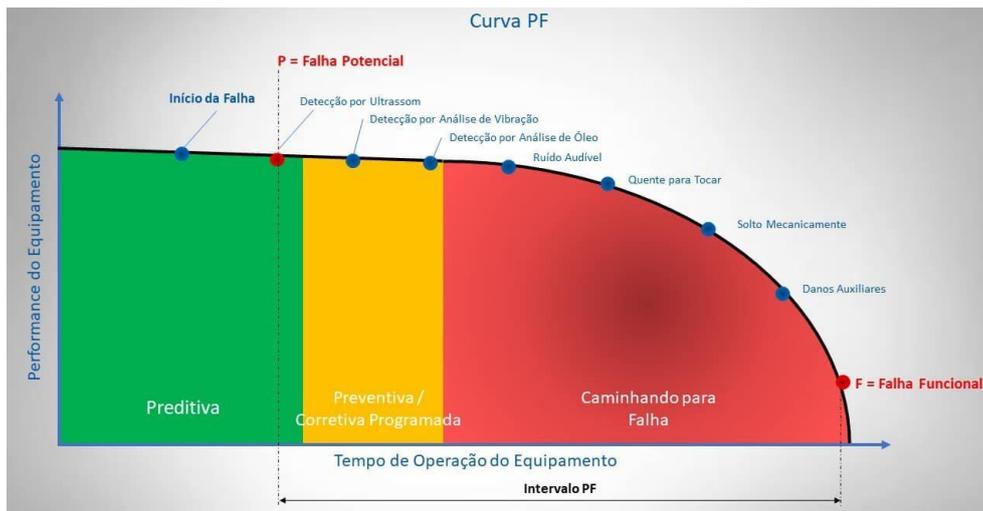


Figura 3.3 - Gráfico curva P-F degradação contínua.

Para falhas com esse comportamento a MCC privilegia, em primeiro lugar, a inspeção preditiva e no segundo plano a inspeção funcional, porque de forma teórica estas, se aplicáveis, conseguem detectar os efeitos provocados por uma falha potencial (calor, vibração, ruído, empeno, ausência e partes, etc.), e assim permitir acompanhar sua evolução. A frequência de inspeção deverá ser menor que o intervalo P-F, pois caso contrário não será possível evitar uma falha funcional tornando inválida a tarefa (RIBEIRO, 2009).

A definição da frequência para atender esse intervalo deve se ater a duas circunstâncias, a primeira é para uma falha ligada ao tempo em operação e a segunda é uma falha aleatória. Para a primeira situação faz-se necessário o acompanhamento da degradação e estipular qual o limite aceitável desta através de análise de probabilidade, instrução do fabricante, sob condição etc.

Já a falha aleatória é mais complexa visto que não tem uma frequência razoavelmente igual uma da outra, entretanto é necessário verificar se ela respeita o intervalo P-F quando ocorre ou a eficácia de mecanismo de medição contínua para sua detecção antes da consumação da falha funcional. Também é estabelecido três condições para viabilidade de uma tarefa por condição são elas: detecção clara da falha potencial; intervalo P-F com variância aceitável e estável; operacionalidade para operar na frequência P-F (MOUBRAY, 2000).

A Figura 3.4 representa um típico componente com falha aleatória predominante com intervalo P-F bem definido. Neste exemplo as falhas foram de frequência: 1 ano, 1,5 anos e 8 meses, entretanto os intervalos P-F foram fixos de 2 meses, então o cálculo

para determinar a frequência mínima necessária é  $\frac{F-P}{2}$  representada pelo triângulo. Isto porque, para esse caso, a inspeção feita a cada 1 mês aumenta significativamente a probabilidade da detecção da falha potencial antes de ocorrer uma falha funcional (S9081-AB-GIB-010, 2009).

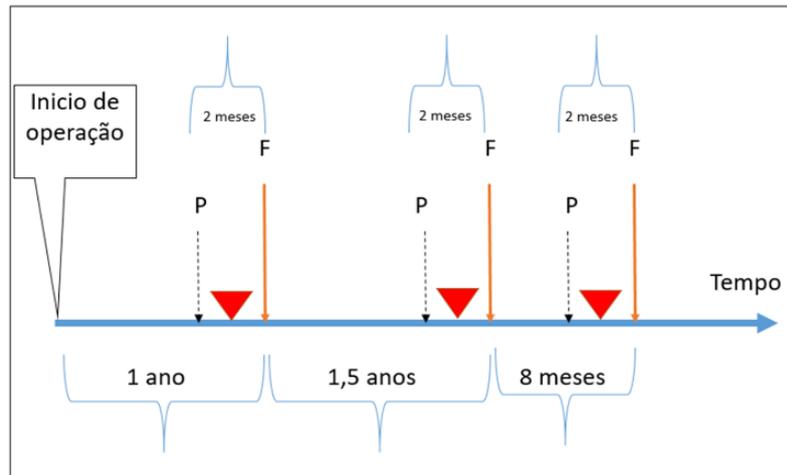


Figura 3.4 - Falha aleatória com mesmo intervalo P-F.

#### 3.2.1.4 - Módulo preventiva

A norma S9081-AB-GIB-010 (2007) define que “tarefas de renovação de vida direcionadas ao tempo são apropriadas quando há evidências de que a maioria das unidades da população terminará sua vida útil em uma idade específica. Neste ponto, algo deve ser feito para renovar a vida antes falha”. NOWLAN (1978) destaca para casos onde envolve segurança, a intervenção deve anteceder aos primeiros sintomas de falha potencial. RIBEIRO (2009) expurga essa antecipação quando não há danos graves deixando evoluir para uma análise de custo benefício.

O gráfico da Figura 3.5 reforça esta abordagem destacando limites inferior e superior, mostrando um ponto ótimo economicamente no cruzamento da curva de sobrevivência  $R(t)$  com a curva de risco  $h(t)$  explorando o máximo da vida útil de um componente. Outro ponto destacado é o limite de vida segura antecedendo ao início de desgaste, isto quando envolve consequências intoleráveis de cunho operacional, custo e segurança.



Figura 3.5 - Gráfico ponto ótimo risco x custo.  
 Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2009).

A primeira tarefa em ordem de prioridade no módulo preventiva é a restauração, porque em boa parte das intervenções não é necessário trocar todo o componente trazendo ganhos nos custos envolvidos. A segunda é a substituição preventiva que consiste na troca por completo de um componente e como salientado anteriormente os custos de forma geral são mais elevados do que restaurar, por isso, sua escolha deve ter um embasamento técnico consistente (RIBEIRO, 2009; KARDEC e NASCIF, 2009).

A Tabela 3.7, a seguir, faz um resumo das tarefas proativas em relação a sua aplicabilidade com relação direta com a efetividade baseado nos fatores segurança, custo e operacional.

Tabela 3.7 - Aplicabilidade e efetividade tarefas proativas.

Tarefa	Aplicabilidade	Efetividade		
		Segurança	Operacional	Econômico
Inspeção Funcional	Deve reduzir a taxa de falha funcional	Tarefa deve reduzir os riscos de falhas	Tarefa deve reduzir os riscos das falhas a nível aceitável	Tarefa deve ter custo reduzido
Inspeção Preditiva	Deve ser possível identificar ou prever uma deteriorização funcional por teste ou inspeção, e o nível P-F deve ser constante.	Tarefa deve reduzir a probabilidade de falhas ou riscos de falhas	Tarefa deve reduzir os riscos das falhas a nível aceitável	Tarefa deve ter custo reduzido, menor que o custo da falha evitada
Restauração Preventiva	Item deve mostrar degradação a uma idade identificável, uma proporção alta de sobreviver àquela idade, e deve ser possível restaurar o item a um padrão especificado.	Tarefa deve reduzir a probabilidade de falhas ou riscos de falhas	Tarefa deve reduzir os riscos das falhas a nível aceitável	Tarefa deve ter custo reduzido, menor que o custo da falha evitada
Substituição Preventiva	Item deve mostrar degradação a uma idade identificável, uma proporção alta de sobreviver àquela idade, e a restauração é impossível a um padrão especificado.	Tarefa deve reduzir a probabilidade de falhas ou riscos de falhas	Tarefa deve reduzir os riscos das falhas a nível aceitável	Tarefa deve ter custo reduzido, menor que o custo da falha evitada

Fonte: SIQUEIRA (2014).

### 3.2.1.5 - Tarefas *default*

Já a Figura 3.6 representa através de um fluxograma o rito na escolha de uma tarefa. As tarefas *default* devem ser aplicadas quando nenhuma tarefa proativa for aplicável e um rigoroso critério deve ser seguido, porque essa modalidade é tratada como exceção necessária por razões de inviabilidade técnica, econômica ou segurança. Na sequência de aplicação a primeira deve ser a tarefa por corretiva e a segunda é a mudança de projeto. MOUBRAY (2000) considera a tarefa de detectiva também como uma modalidade *default*, sendo esta a primeira na sequência de prioridades para o autor, entretanto será tratada de forma independente de acordo com RIBEIRO (2009).

A primeira ação na prioridade *default* é a aplicação da tarefa de corretiva, então deve-se optar, somente se, algumas premissas forem atendidas de acordo com MOUBRAY (2000) sendo: nenhuma tarefa proativa conseguir evitar a falha, e a consequência da falha não tem influência significativas na segurança e ao meio ambiente; as tarefas proativas numa análise custo-benefício não são viáveis e o reparo é tolerável

Por fim, se esgotadas todas possibilidades anteriores de aplicação, então implica uma alteração no projeto de forma total ou parcial que altere as características originais do projeto. SMITH e HINCHCLIFFE (2004) reforçam os conceitos da MCC e a necessidade de seguir o rito para escolha da tarefa. Seguem alguns exemplos caracterizando mudança de projeto: inserção de redundância, adição de estrutura para reforço, aumento de capacidade, repotenciamento de componentes, alteração de capacidade nominal, dentre outros, sendo esse escopo de responsabilidade da engenharia de manutenção (KARDEC e NASCIF, 2009).

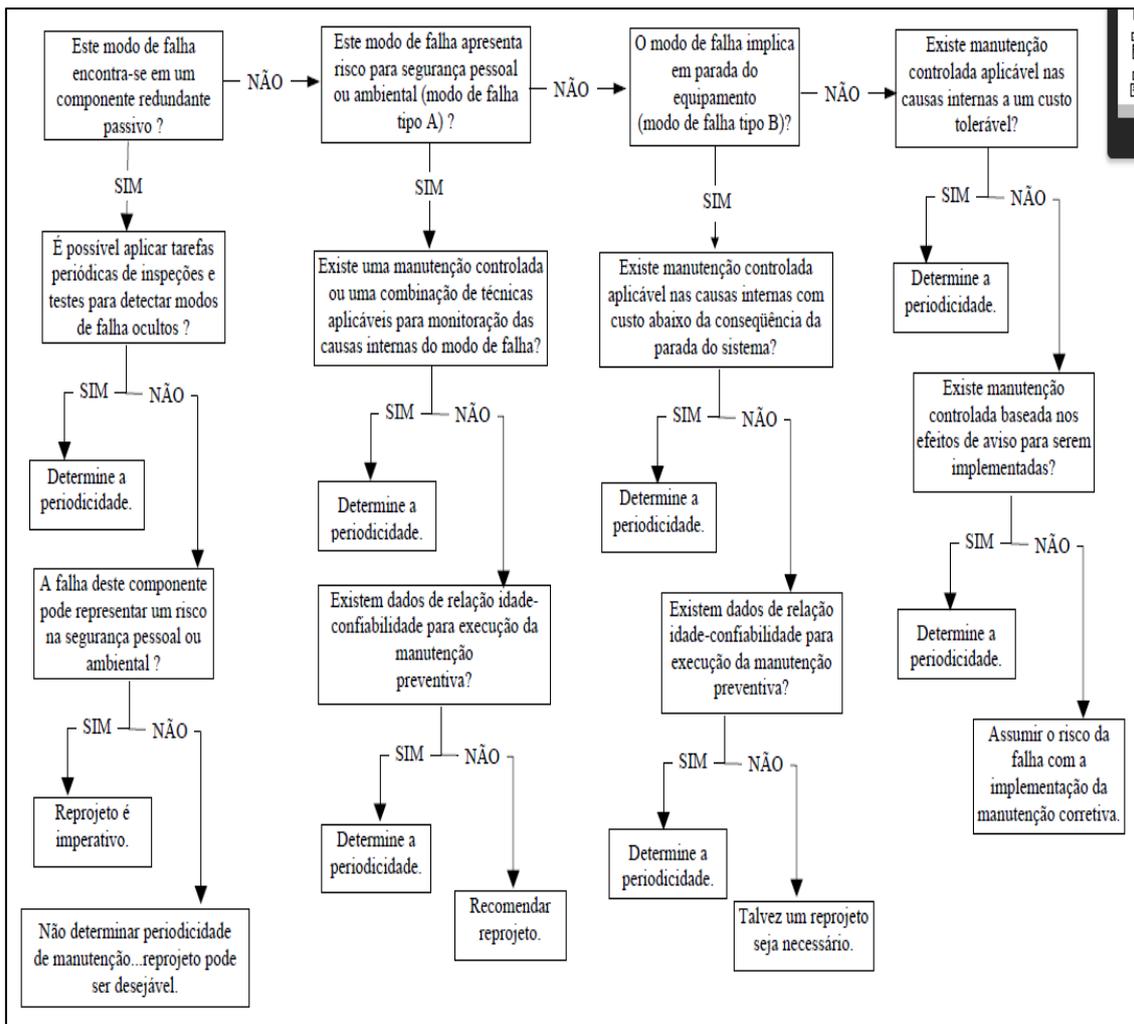


Figura 3.6 - Diagrama de definição de tarefas de manutenção através de diagrama lógico.

Fonte: VINADÉ (2003).

### 3.2.1.6 - Tarefa detectiva

É uma técnica recente desenvolvida e é exclusiva para detectar falhas ocultas, pois com o aumento das complexidades e conexões entre componentes. Diferente das técnicas anteriores, a detectiva visa simular um determinado cenário anormal para verificar na prática se os equipamentos, dispositivos e toda arquitetura de controle irão detectar e realizar a função para que eles foram programados (KARDEC e NASCIF, 2009).

É uma técnica que requer toda uma atenção da engenharia de manutenção, pois o teste visa elevar os elementos a grandezas intoleráveis para os quais o sistema fora programado a detectar como anomalia e reagir, como exemplo simular a *sobre velocidade* de um elevador para pessoas e verificar se de fato o freio de emergência vai

atuar, ou aumentar a pressão de uma caldeira a fim de verificar se esta válvula de fato descarregará para tanque.

Aqui se observam duas situações, primeiro, a inspeção detectiva se caracteriza por elevar a grandezas não operacionais, ainda há situações que o teste se torna inviável por inviabilidade técnica, operacional ou mesmo de segurança.

MOUBRAY (2000) coloca a aplicação dessa técnica antes da modalidade default, ainda acrescenta que a frequência será feita muito em razão da particularidade de cada elemento estudado com as devidas restrições e a análise de viabilidade.

### 3.2.1.7 - Diagrama final de decisão

O diagrama final de decisão da Figura 3.7 compila todas as tarefas colocando-as em ordem direta de aplicação, com suas devidas peculiaridades sequenciais. O primeiro ponto a analisar sempre é a questão da eficiência em determinada tarefa em evitar falhas, a outra questão são fatores como segurança, meio ambiente e custo.

A MCC prioriza sempre o uso de técnicas baseadas na condição como a preditiva e monitoramento, após será a restauração e por conseguinte a substituição. Então, caso não seja possível o emprego das técnicas supracitadas, logo e só assim, serão utilizadas as tarefas *default*, priorizando a tarefa corretiva, e, em último caso, a opção é alterar o projeto, ou seja, reengenharia.

Para falhas ocultas são usadas as técnicas de detectiva, sendo essa pouco utilizada e está diretamente ligado a sistemas e equipamentos de controle, segurança e standby, onde só entra em regime de trabalho quando há falha ou irregularidade operacional no sistema.

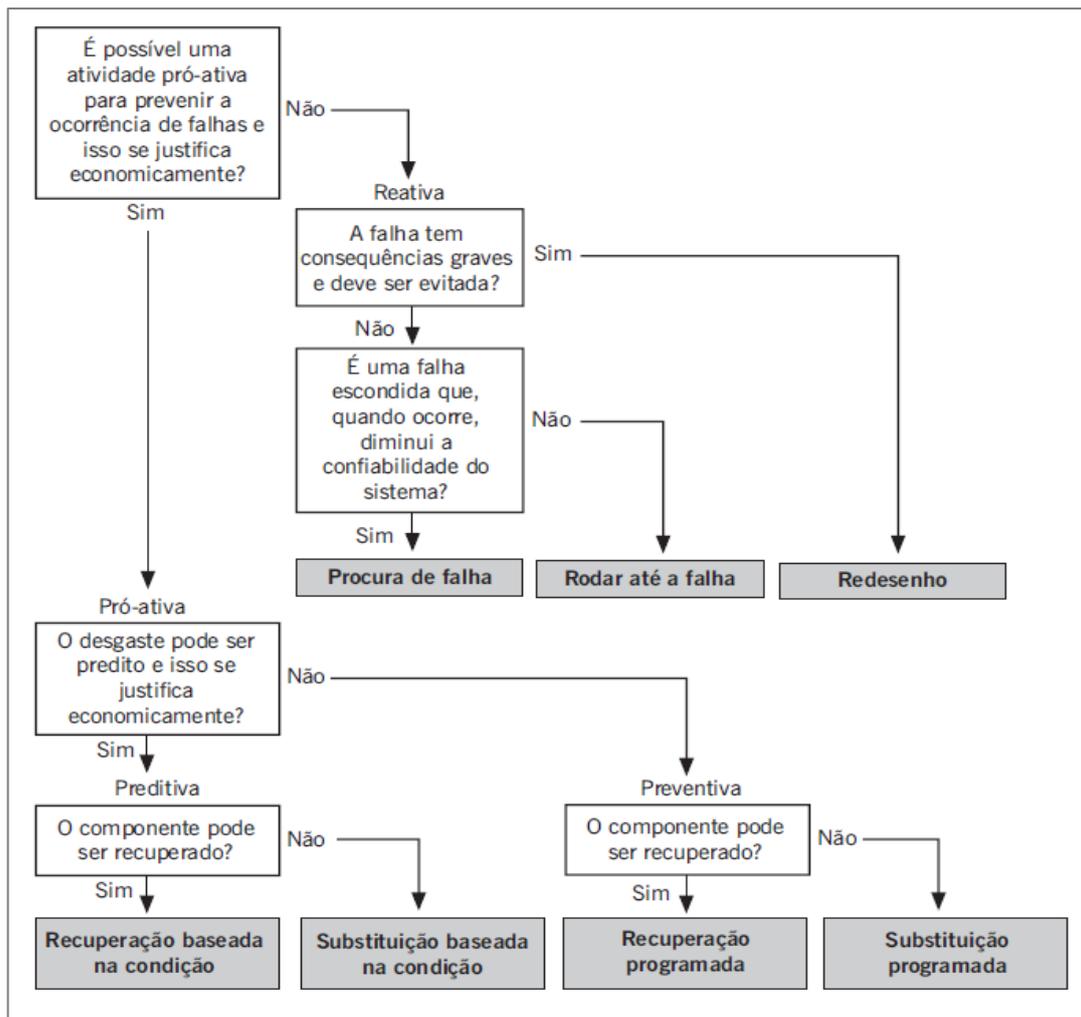


Figura 3.7 - Diagrama de decisão final para aplicação de tarefas de manutenção.  
 Fonte: FLOGLIATO E RIBEIRO (2009).

### 3.3 - DESCARREGADOR DE VAGÕES - DV

Os descarregadores de vagões serão referidos a partir daqui como DV para um equipamento e DVs para dois ou mais, por ser o modo referido no cotidiano operacional desta planta. Os equipamentos objeto deste presente trabalho pertencem a uma empresa de mineração e ficam localizados no estado do Maranhão.

O porto faz parte de um sistema integrado (mina, ferrovia e porto) com capacidade de movimentar atualmente 205 milhões de toneladas por ano de minério de ferro, sendo o minério de ferro único produto processado pelos DVs. Neste porto há oito descarregadores de vagões, sendo de três projetos e fabricantes distintos, porém com as mesmas capacidades operacionais e construtivas, como:

- Capacidade descarregamento por hora de 8.000 mil toneladas;
- Descarregamentos sempre em pares de vagões;

- Capacidade de descarregar um lote com 110 vagões;
- Peso médio de cada vagão é de 110 toneladas;
- Peso médio específico do material de 2,8 a 3,5 toneladas por metro cúbico;
- Tempo médio para descarga de um lote é de 95 minutos.

O DV é o equipamento responsável por descarregar vagões tipo gôndola<sup>12</sup>. Geralmente um projeto para esse equipamento é elaborado de forma customizada para atender um determinado tipo de aplicação dentro de um contexto operacional. Existem vários modelos pelo mundo com alterações a níveis de componente, mas de forma geral seguem um mesmo conceito de arquitetura.

Os DVs são divididos em 4 partes conforme as Figuras 3.8 e 3.9: a primeira é o carro empurrador (1), responsável em posicionar um par de vagão por vez; após temos o giro (2), responsável em girar os vagões em 180° para retirada de todo o material; em seguida temos a moega (3), responsável em armazenar esse material e gerar fluidez; por último, temos o alimentador de correia (4), responsável em receber o material da moega e criar fluxo contínuo de carga para os transportadores de correia.

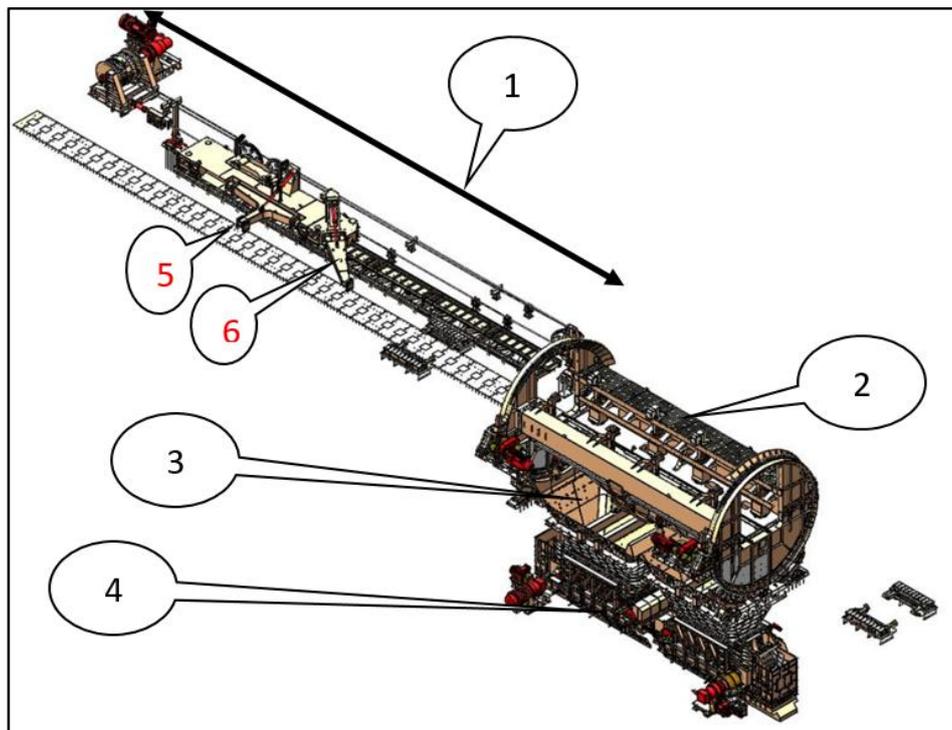


Figura 3.8 - Vista 3D do descarregador de vagões.  
 Fonte: Adaptado do DESENHO MINERADORA (2020)

<sup>12</sup> Vagão tipo gôndola – “É o tipo de vagão que transporta produtos que não necessitam de proteção contra as intempéries. É o mais comum no Brasil por ser o tipo mais comum no transporte de minérios”. (<https://www.brasilferroviario.com.br/tipos-de-vagoes/>, 05/08/2018).

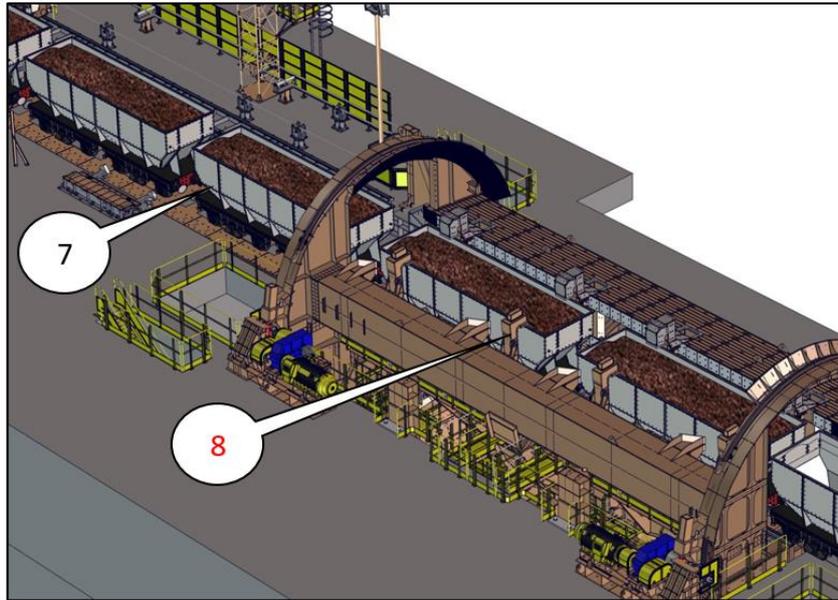


Figura 3.9 - Vista 3D dinâmica de descarregamento de vagões.  
 Fonte: Adaptado do DESENHO MINERADORA (2020).

Detalhes seguem abaixo:

- O carro é tracionado por cabos de aço e possui dois braços, um principal (5) e outro auxiliar (6), este último só opera o último par de vagão que atraca ao vagão (7), logo após, o par de vagão é empurrado para dentro do giro e posicionado. Em seguida o braço desatraca desse vagão retorna e atraca no próximo par de vagão carregado fazendo o mesmo ciclo anterior e assim sucessivamente até o término do lote em descarga. O carro é tracionado através de cabo de aço;
- O giro recebe o par de vagão do carro empurrador e os trava através de grampos de ancoragem (8), após gira esse par de vagão até 180° depositando todo o material na moega. A tração do giro é através de cremalheiras e pinhão;
- A moega (3) tem como função receber e formar um reservatório de tal forma a equilibrar a entrada de material através dos vagões e saída que é abastecer de forma contínua os alimentadores de correia;
- Os alimentadores (4) de correia recebem ininterruptamente o material granel advindo da moega e abastece continuamente uma linha de descarregamento formado por transportadores de correia.

Ao tratar de indicadores do processo, a Tabela 3.8 é um recorte entre janeiro de 2019 a fevereiro de 2020 e mostra o histórico dos principais indicadores de manutenção do processo de descarregador de vagões, incluindo a confiabilidade (DI), tempo médio

de reparo após falha funcional (MTTR), tempo médio entre falhas (MTBF), a quantidade em horas de manutenção preventiva (HMP), a quantidade de manutenção corretiva (HMC), a quantidade de falhas de todas as disciplinas (mecânica, hidráulica, elétrica, automação) e por último a relação de manutenção corretiva sobre manutenção preventiva.

Tabela 3.8 - Histórico de performance de jan/19 a fev/20 com as quantidades de falha.

Ano	MÊS	DI	DI META	MTTR	MTTR META	MTBF	MTBF META	HMP	HMC	QTD_FALHAS	% HMC
2019	janeiro	86,9%	85,7%	<b>0,28</b>	0,25	1,86	1,72	1.494,3	615,0	2.189	29%
2019	fevereiro	86,0%	85,4%	<b>0,29</b>	0,25	1,76	1,72	1.498,0	621,0	2.167	29%
2019	março	<b>79,1%</b>	85,4%	<b>0,37</b>	0,25	<b>1,41</b>	1,72	1.401,2	728,5	1.960	34%
2019	abril	<b>83,4%</b>	84,0%	<b>0,32</b>	0,25	<b>1,58</b>	1,72	1.257,6	658,7	2.084	34%
2019	maio	87,3%	84,4%	<b>0,27</b>	0,25	1,88	1,72	1.274,3	565,8	2.080	31%
2019	junho	<b>86,5%</b>	86,5%	<b>0,29</b>	0,25	1,87	1,72	1.290,0	727,2	2.490	36%
2019	julho	<b>86,7%</b>	86,8%	<b>0,29</b>	0,25	1,90	1,72	1.317,3	703,4	2.409	35%
2019	agosto	89,3%	87,4%	0,20	0,25	<b>1,66</b>	1,72	762,9	332,1	1.672	30%
2019	setembro	88,0%	86,0%	0,23	0,25	<b>1,72</b>	1,72	561,1	323,8	1.387	37%
2019	outubro	88,7%	86,8%	0,24	0,25	1,92	1,72	688,5	294,4	1.202	30%
2019	novembro	87,9%	86,4%	0,24	0,25	<b>1,71</b>	1,72	659,2	306,2	1.301	32%
2019	dezembro	91,5%	86,0%	0,21	0,25	2,24	1,72	609,2	211,9	1.018	26%
<b>2020</b>	Janeiro	88,0%	86,7%	0,28	0,28	2,05	1,72	677,2	277,8	991	29%
<b>2020</b>	Fevereiro	<b>85,9%</b>	86,3%	<b>0,32</b>	0,28	<b>1,93</b>	1,72	729,7	324,9	1.028	31%

Essa tabela mostra um processo instável com uma variação aleatória da confiabilidade com ênfase maior no primeiro semestre do ano de 2019. O MTTR ficou fora da meta em 6 meses dos 14 meses medidos, ou seja, o tempo de reparo foi longo e afetou o indicador confiabilidade diretamente. Houve uma melhora dos indicadores no segundo semestre de 2019, porém não foram efetivos, visto que voltam a não atingir a meta em fevereiro.

Sobre o MTBF, observa-se que ficou abaixo da meta estabelecida em 7 meses de 14 medidos. Assumiu um comportamento aleatório, não relacionando o tempo de preventiva com a diminuição de falhas. Outro indicador a ser considerado é a porcentagem de corretiva sobre as horas totais de manutenção, em média essa proporção gira em torno de 30%, então é fato que 1/3 das tarefas de manutenção são reativas.

O gráfico representado pela Figura 3.10 descreve o desempenho e o quanto cada disciplina impactou o processo de DVs no intervalo de janeiro 2019 a fevereiro de 2020. A disciplina de elétrica está com a maior quantidades de falhas, com 5475 eventos e em segundo com maior HMC<sup>13</sup> totalizando 1249 horas. Após vem a disciplina de hidráulica com 5905 eventos e 1207 horas de HMC. A disciplina mecânica vem logo em seguida destoando das anteriores porque fica em primeiro lugar em HMC com 1372 horas,

<sup>13</sup> HMC – Horas de manutenção corretiva

entretanto com baixo números de eventos, no total de 2962, comparando com as duas primeiras. Por último está a automação com uma curva contrária às três anteriores, onde há mais eventos, num total de 1888, e baixo HMC, totalizando 426 horas.

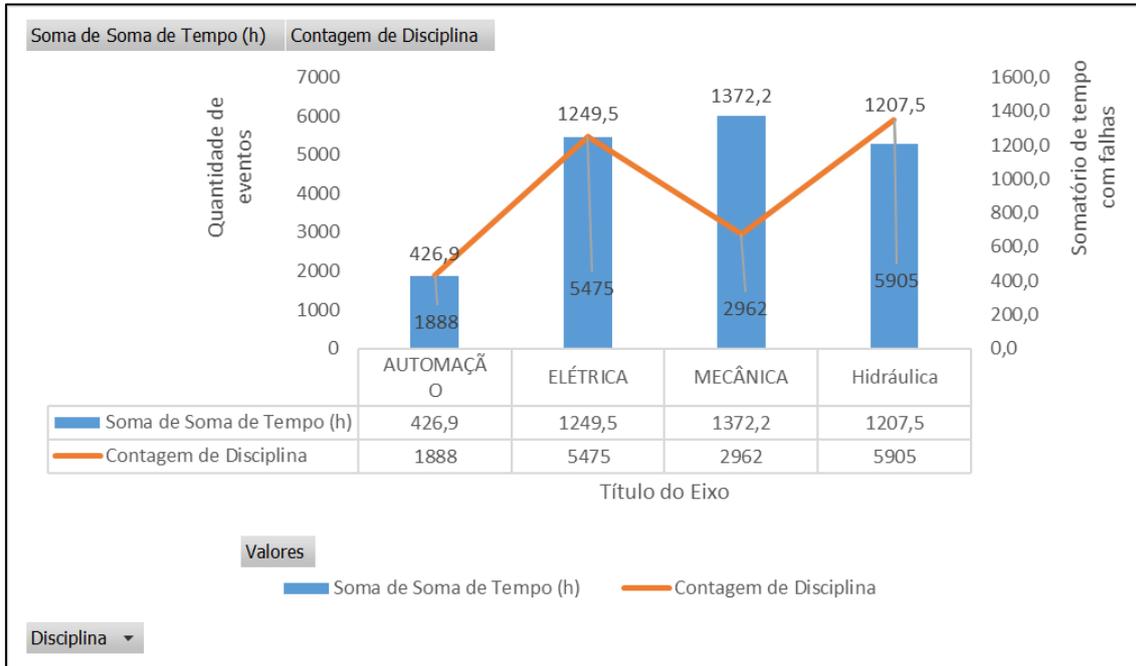


Figura 3.10 - Gráfico quantidade de falhas e tempo de horas corretivas por disciplina.

Esses indicadores e números até aqui citados são referentes a todos os equipamentos do processo contemplando DVs, transportadores de correia (TR) e empilhadeiras de minério (EP), abaixo será estratificado por disciplina.

Desdobrando ao nível de componente num gráfico de Pareto de HMC x número de falhas, tem-se o gráfico representado pela Figura 3.11. O componente grampo é o maior agressor, com 28,71%, e em segundo a componente unidade hidráulica com 15,28%; somados, estes dois correspondem a 43,29% das falhas totais, e esses dois componentes fazem parte dos DVs.

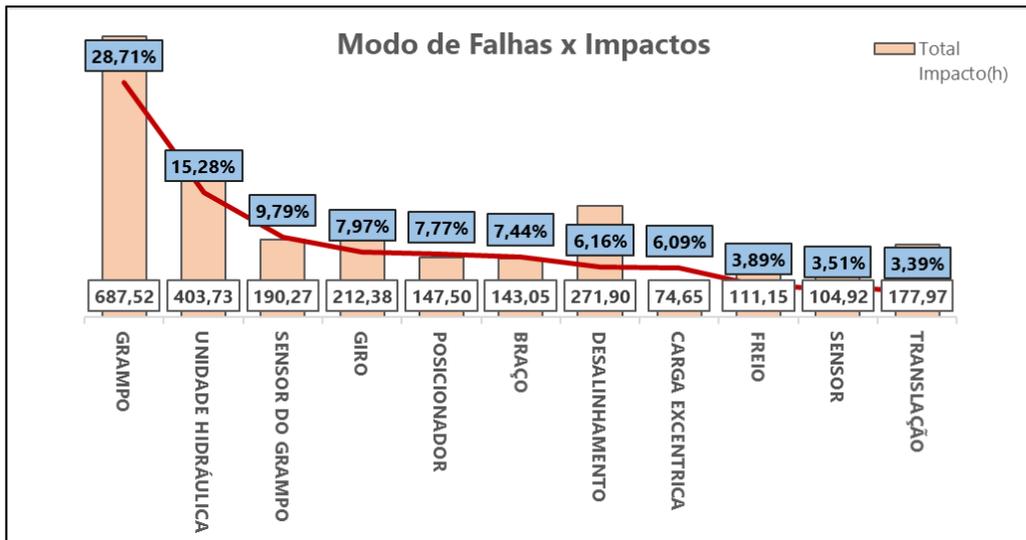


Figura 3.11 - Gráfico número de falhas x quantidade de horas corretivas.

Porém, o DG-H demonstra um alto nível de falha em ambos componentes conforme Figura 3.12 e a atenção é que o componente grampo é composto por subcomponentes elétricos, mecânicos e hidráulicos. Os DVs – A, B, C, G e H são de um mesmo fabricante e projeto, logo, as iniciativas elaboradas para um é replicável para os demais.

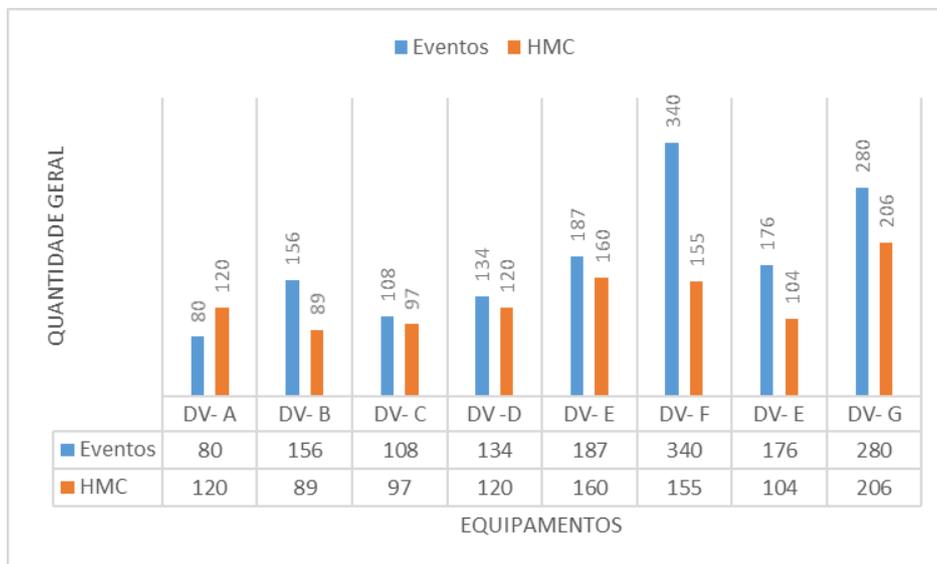


Figura 3.12 - Equipamento x local da falha.  
Fonte: Adaptado do DESENHO MINERADORA (2020).

A partir desta análise e nas considerações de SMITH e HINCHCLIFFE (2004), que fala da necessidade de selecionar um problema baseado na regra de Pareto para ter

êxito, fica perceptível como as falhas funcionais em grampos e unidade hidráulica impactam o sistema onde estão inseridos.

Dessa forma destaca-se a importância e o diferencial propostos neste trabalho: aplicar a MCC no sistema hidráulico de um descarregador de vagões, sendo plausível obter ganhos significativos com a sua aplicação. Também verificado a possibilidade em obter ganhos de escala e produtividade replicando, em regra geral, soluções de um DV para outros DVs com o mesmo projeto.

Para tratar do sistema hidráulico dos descarregadores, otimizaremos a escrita, denominando o sistema hidráulico como SH, que compreende todos componentes de um sistema. A unidade hidráulica será tratada como UH e é formada por uma unidade geradora de pressão, excluindo dutos, cilindros e periféricos.

O SH do descarregador tem função importante e falhas neste sistema compromete o processo de duas formas, a primeira é através da falha funcional e a segunda ocasionando distúrbios em seu funcionamento como movimento involuntário de partes móveis podendo gerar acidentes material e pessoal.

No DV aqui estudado há três sistemas hidráulicos distintos, sendo um desembarcado, ou seja, externo a máquina representada na Figura 3.13, com a função de acionar os cilindros dos grampos do giro (setas amarelas) e, de acionar cilindros dos grampos de rodeiros dos vagões localizados na entrada e saída do giro (setas verdes).



Figura 3.13 - Vista geral sistema giro e travas do vagão.  
Fonte: Adaptado do DESENHO MINERADORA (2020).

O segundo sistema é embarcado e fica localizado em cima do carro móvel responsável em movimentar o braço principal (BP) e o braço auxiliar (BA), como se pode observar na Figura 3.14. O último, também SH, é desembarcado do sistema tensionador de cabos (STC), conforme exposto na Figura 3.14, com a função de tensionar o cabo através do avanço ou retorno do cilindro.

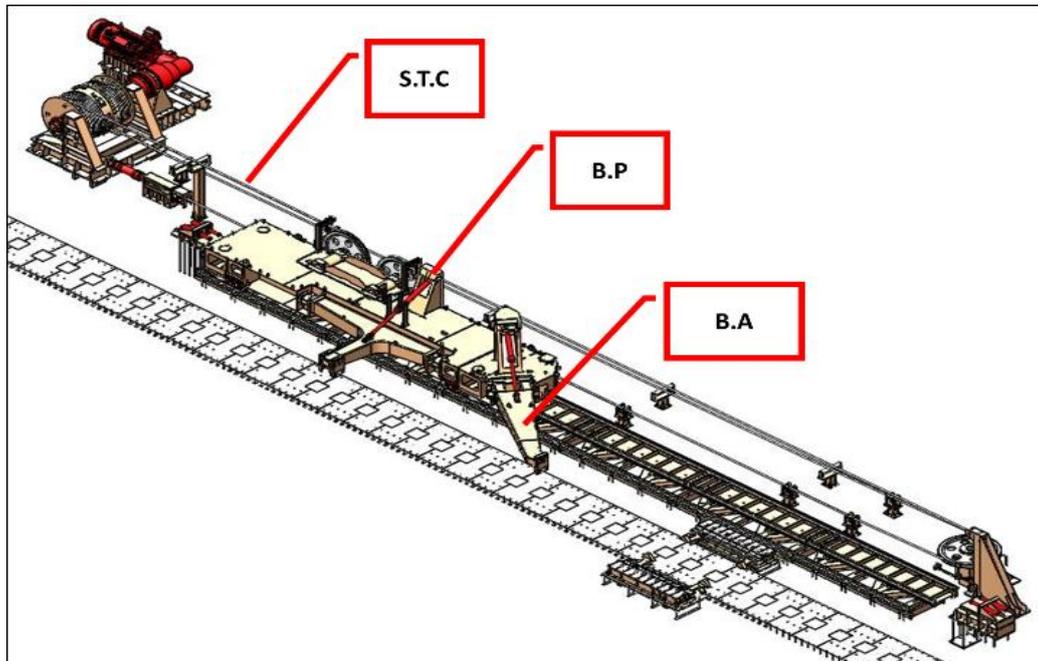


Figura 3.14 - Vista geral do carro posicionador.  
Fonte: Adaptado do DESENHO MINERADORA (2020).

O SH carro posicionador, giro e tensionador de cabos, de forma geral, tem a mesma concepção e são compostos por bomba, reservatório, cilindros, blocos *manifold*, mangueiras, tubulações, válvulas e todo um sistema de comando e controle eletroeletrônico. Neste projeto cada UH tem dois circuitos independentes e redundantes, denominado sistema principal e *standby* trabalhando em regime de revezamento e nunca em paralelo. O intuito é para reconectar o sistema em casos de falhas potenciais ou funcionais neste sistema específico.

A concepção de projeto utiliza válvulas de ventagem, responsáveis em criar obstrução ao fluxo e assim gerar pressão. Essas válvulas são normalmente abertas e só fecham quando é necessário movimentar um cilindro; válvulas direcionais acionadas para movimentar o cilindro, ou seja, avançando-o ou retornando-o; acumuladores de pressão que tem a função de manter uma velocidade uniforme e ágil; um sistema off-line de filtragem e resfriamento de óleo.

O funcionamento consiste em uma bomba acoplada a um motor, podendo gerar pressão de até 250 BAR, porém a pressão de trabalho é de 150 BAR. Para pressurizar e chegar à pressão de trabalho é solicitado ao operador do equipamento para ligar remotamente o conjunto moto-bomba; após isso, um bloco é energizado e por conseguinte a válvula de ventagem vai para posição fechada e instantaneamente é gerado pressão no sistema. Com o sistema pressurizado, então é acionado as válvulas direcionais para avançar ou retornar os cilindros, assim obtendo o movimento operacional desejável.

O esquema hidráulico representado na Figura 3.15, mostra o conceito básico do SI dos viradores, não representando todos os elementos existentes. Deve-se atentar a 4 elementos básicos numa sequência lógica: 1 a bomba (M) é acionada; 2 a válvula de ventagem (S1) fecha gerando pressão no sistema; 3 com sistema pressurizado a válvula direcional pilota no sentido (S1) ou (S2) avançando ou retornando o cilindro.

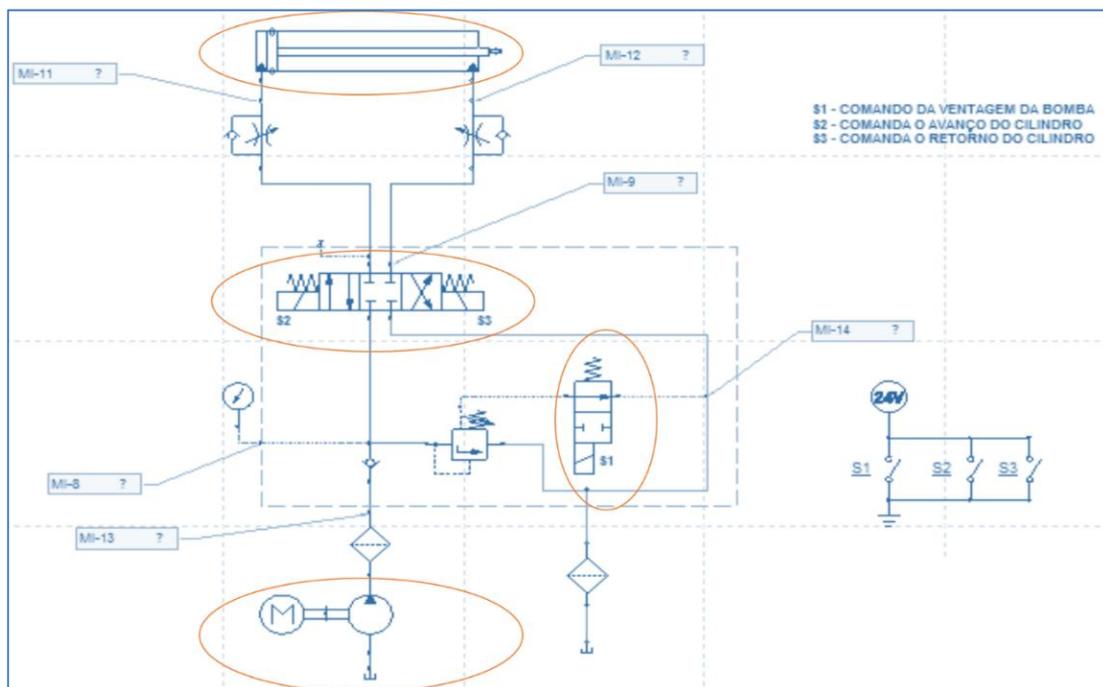


Figura 3.15 - Representação simples da concepção do sistema hidráulico.  
 Fonte: Adaptado de DESENHO MINERADORA (2020).

A Tabela 3.9 exibe a lista de componentes das unidades que serão analisadas neste trabalho.

Tabela 3.9 - Lista de componentes de unidades hidráulicas.

Componentes da Unidade Hidráulica do Descarregador de Vagões					
UH - GRAMPOS		UH - POSICIONADOR		UH - ESTICAMENTO	
DESCRİÇÃO	QTD	DESCRİÇÃO	QTD	DESCRİÇÃO	QTD
1 VÁLVULA DE ESFERA 2.1/2"	4	ATUADOR	3	ATUADOR LINEAR	1
2 VÁLVULA DE ESFERA 2"	16	VÁLVULA DE ESFERA 2"	2	RESERVATÓRIO DE ÓLEO 150L	1
3 VÁLVULA DE ESFERA 1.1/4"	8	VÁLVULA DE ESFERA 1.1/2"	4	VÁLVULA DE ESFERA 3/4"	1
4 VÁLVULA DE ESFERA MKH G2"	8	VÁLVULA DE ESFERA 1/2"	4	VÁLVULA DE ESFERA 1"	1
5 SENSOR INDUTIVO MHC 0890	8	ACUMULADOR	2	BOMBA DE PALHETA	2
6 ATUADOR LINEAR (CILINDRO)	8	VÁLVULA DE ESFERA 1.1/4"	2	MOTOR ELÉTRICO	2
7 TRANSDUTOR DE PRESSÃO	10	TRANSMISSOR DE PRESSÃO	1	ACOPLAMENTO	2
8 VÁLVULA RETENÇÃO PILOTADA	16	VÁLVULA DIRECIONAL PROPORCIONAL	8	FLANGE DE LIGAÇÃO	2
9 BLOCO MANIFOLD	14	FILTRO DE PRESSÃO	2	FILTRO DE PRESSÃO	2
10 VÁLVULA DE ESFERA 1.1/2"	16	FILTRO DE RETORNO	2	FILTRO DE RETORNO	2
11 VÁLVULA DE ESFERA 1"	8	FILTRO DE AR	1	TRANSMISSOR DE PRESSÃO	2
12 VÁLVULA DIRECIONAL	14	RESERVATÓRIO	1	TRANSMISSOR DE TEMPERATURA	1
13 VÁLVULA DE ESFERA 4"	3	TRANSDUTOR DE TEMPERATURA	1	BLOCO MANIFOLD	2
14 VÁLVULA DE ESFERA 3.1/2"	4	TRANSDUTOR DE NÍVEL	1	VÁLVULA DIRECIONAL	4
15 ELEMENTO LÓGICO	8	VÁLVULA DE ESFERA 3/4"	4		
16 BOMBA DE PALHETAS	4	VÁLVULA DE ESFERA 1.1/4"	1		
17 ACOPLAMENTO	4	BOMBA DE PALHETAS	2		
18 MOTOR	4	MOTOR ELÉTRICO	2		
19 FILTRO DE PRESSÃO	4	ACOPLAMENTO	2		
20 FILTRO DE RETORNO	4				
21 TROCADOR DE CALOR	1				
22 TRANSDUTOR DE TEMPERATURA	1				
23 TRANSDUTOR DE NÍVEL	1				
24 FILTRO DE AR	2				
25 RESERVATÓRIO 2500L	1				

Fonte: Adaptado do DESENHO DO EQUIPAMENTO (2020).

## CAPÍTULO 4

### IMPLEMENTAÇÃO DA MCC NO DESCARREGADOR DE VAGÕES

Para responder as sete questões básicas do MCC é necessária toda uma estrutura ordenada e sequencial, então no capítulo 2 na revisão de literatura, foi abordado os conceitos do MCC, suas ferramentas e estrutura.

Em relação a aplicação propriamente dita da metodologia MCC, verifica-se divergências entre os principais autores como NOWLAN e HEAP (1978), SMITH e HINCHCLIFFE (2004), MOUBRAY, (2001), RIBEIRO (2009), FLOGLIATO (2009). Estas estão relacionadas a pequenas composições adaptadas ao contexto da experiência individual de cada autor, sendo que essa mistura de conhecimento se torna importante, cabendo ao pesquisador a escolha do mais adequado.

O primeiro passo do pesquisador foi definir a estrutura ordenada para início do planejamento de implantação, neste sentido ficaram disposto conforme a Figura 4.1:

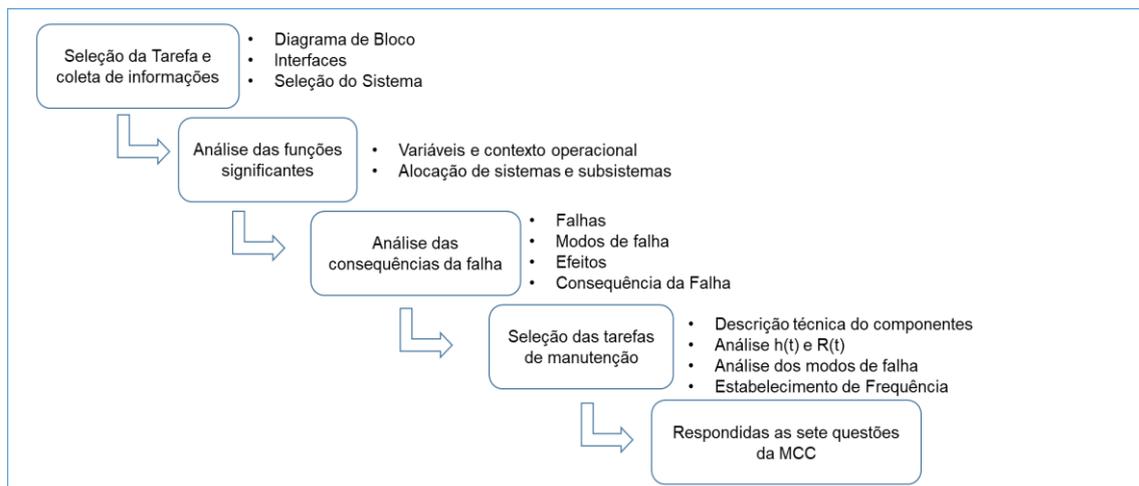


Figura 4.1 - Estrutura ordenada de implantação MCC.

Fonte: Adaptação (RIBEIRO, 2009; RIGONI, 2009)

#### 4.1 - SELEÇÃO DE SISTEMA E SUBSISTEMA

##### 4.1.1 - Diagrama de blocos

A Figura 4.2 mostra como ficou dividido o esquema hidráulico do VV, onde existe três sistemas principais distintos. A primeira divisão (1) expõe o sistema hidráulico do carro, sistema hidráulico do giro e sistema hidráulico das travas. Cada

sistema é dividido em quatro subsistemas semelhantes (2) e há dois subsistemas comuns para o SH do giro e das travas de vagões (3).

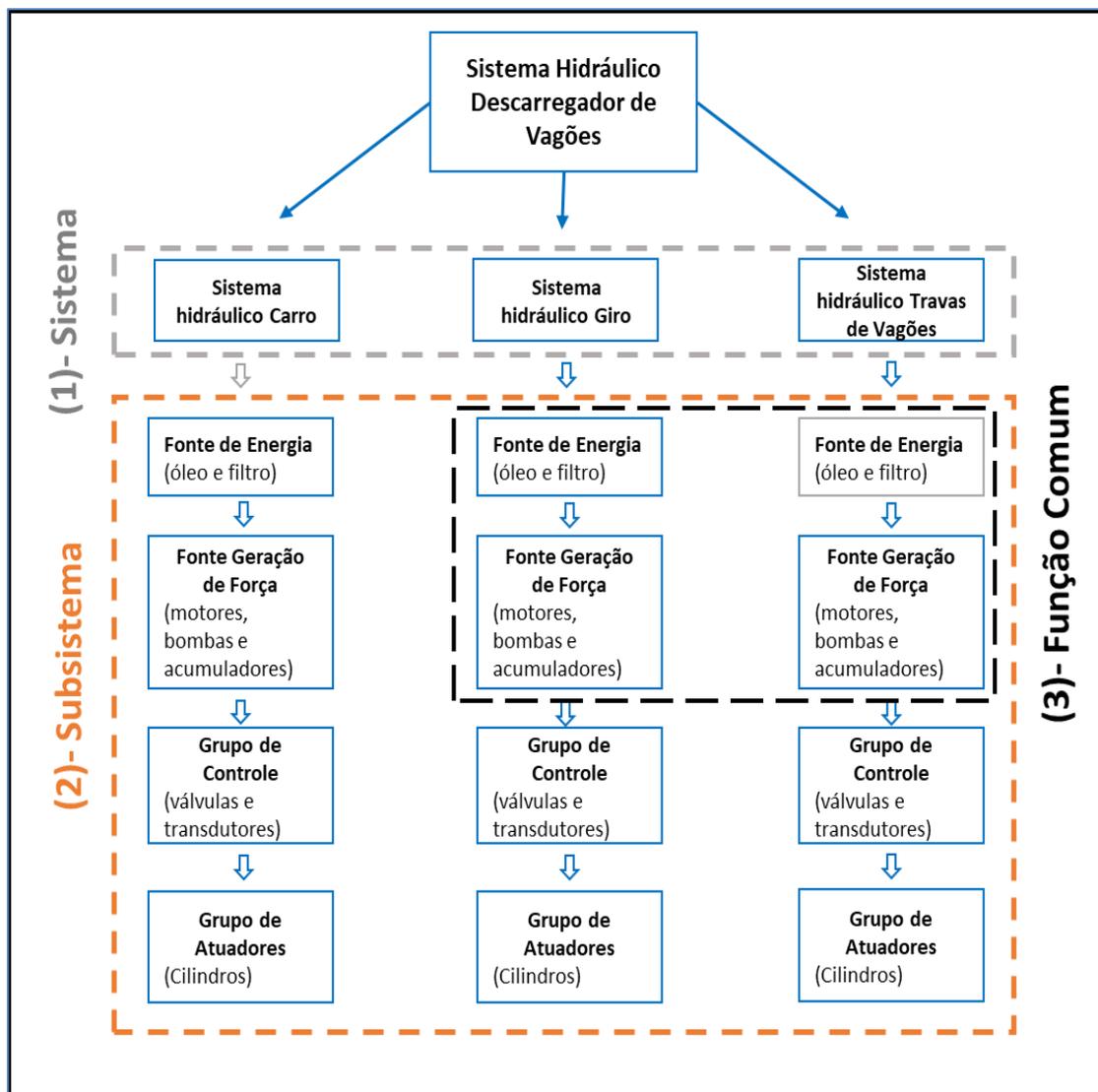


Figura 4.2 - Divisão do esquema hidráulico em sistema e subsistema.

O sistema em questão apresenta uma singularidade, pois todos subsistemas são semelhantes conforme Figura 4.2, ou seja, tem as mesmas funções mantendo um alto grau de padronização, entretanto há diferenças em quantidade e tamanho dos componentes. Dessa forma será considerado uma função única para subsistema com o mesmo descritivo. Abaixo seguem as funções de cada sistema e subsistema:

- Sistema Hidráulico do Carro (SHC): Tem a função de baixar e levantar os braços principal e auxiliar para posicionar vagões no giro e é composto pelos subsistemas energia, geração de força, controle e atuadores;

- Sistema Hidráulico Grampo do Giro (SHG): Tem a função de travar um par de vagões para serem girados e descarregados para moega e é composto pelos subsistemas energia, geração de força, controle e atuadores;
- Sistema Hidráulico Trava de Rodeiro (SHR): Tem a função de travar os rodeiros do vagão antecessor e posterior ao giro afim de evitar seu deslocamento durante o giro e é composto pelos subsistemas energia, geração de força, controle e atuadores.

Os três sistemas foram divididos de tal forma que possuem a mesma estrutura onde os subsistemas têm semelhanças entre si, já que sua concepção de projeto privilegiou um alto nível de padronização, abaixo segue os subsistemas comuns aos três subsistemas:

- Subsistema Energia: Sua função principal de transmitir energia através do fluido hidráulico, como funções secundárias tem-se de manter a temperatura interna em equilíbrio e lubrificação dos elementos móveis internos. É formado por fluido hidráulico, filtros, tanque de óleo, tubulações rígidas e mangueiras flexíveis;
- Subsistema Geração de Força: Tem como função principal transformar energia mecânica em energia hidráulica. É composto por motor e bomba hidráulica;
- Subsistema Grupo de Controle: Sua função principal é aplicar movimentos no braço principal e auxiliar de forma controlada. É formado por válvulas direcionais, de pilotagem, de trava, de controle, de fluxo, de segurança e de ventagem;
- Subsistema Grupo de Atuadores: Tem função principal transformar energia hidráulica em energia mecânica através de movimentos de avanço e retração movimentando os elementos mecânicos ligados diretamente a ele. É formado pelo cilindro contemplando seu bloco e interligações com o sistema mecânico do braço como rótula e pino.

#### **4.1.2 - Interfaces internas e externas do carro empurrador**

O diagrama da Figura 4.3 representa a interface com os componentes do SH carro empurrador e sua conexão de entrada e saída com outros sistemas, sendo os detalhes deste circuito descritos abaixo:

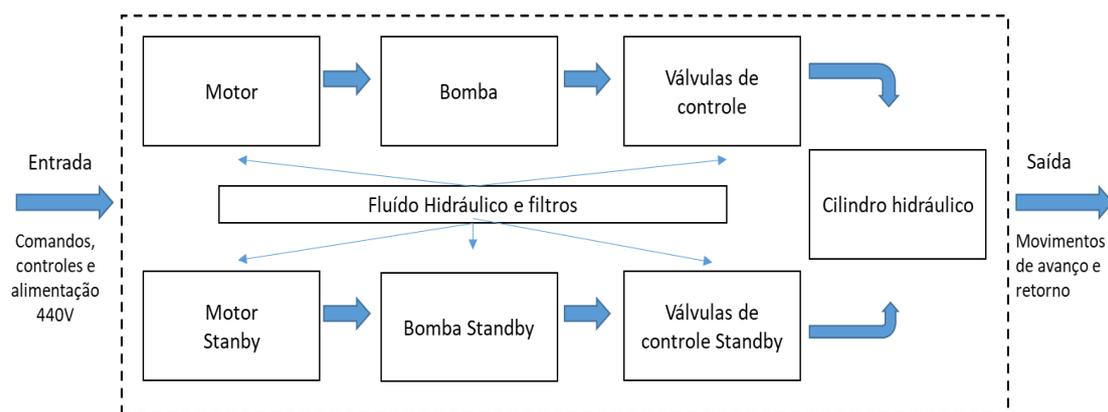


Figura 4.3 - Diagrama de interfaces e funcional do SH carro empurrador.

- 1º entrada - O sistema da Figura 4.3 tem interface com outro sistema através do recebimento de sinal analógico e digital 24V para controles e 440V para comandos que são acionados quando há necessidade de movimentos ou necessita ficar em estado *standby*;
- 2º - Ao receber comando o motor é acionado e automaticamente ativa a bomba hidráulica que está no mesmo eixo gerando fluxo de fluido no sistema de forma contínua, que são conduzidas através das tubulações e mangueiras para todo o sistema;
- 3º - Os sistemas de válvulas de controle são acionados de forma orquestrada, restringindo o fluxo de óleo através das válvulas de ventagem gerando pressão nominal de 140 BAR no sistema, em seguida, as válvulas direcionais são acionadas direcionando o fluxo de óleo até o cilindro e em paralelo é pilotado outras válvulas de bloqueio e segurança para o sistema fique em harmonia e sobre constante monitoramento de velocidade, pressão e rampa de aceleração ou desaceleração;
- 4º - O cilindro hidráulico é acionado pelo fluxo de fluido gerando movimento de avanço ou retração com controle de velocidade e torque;
- 5º - O braço principal ou auxiliar é movimentado baixando ou elevando totalmente. Baixo, ele apoia-se na barra rígida do vagão habilitando o carro empurra vagões e alto ele habilita a translação do carro para retornar à posição inicial para posicionar no próximo para de vagão a ser empurrado.

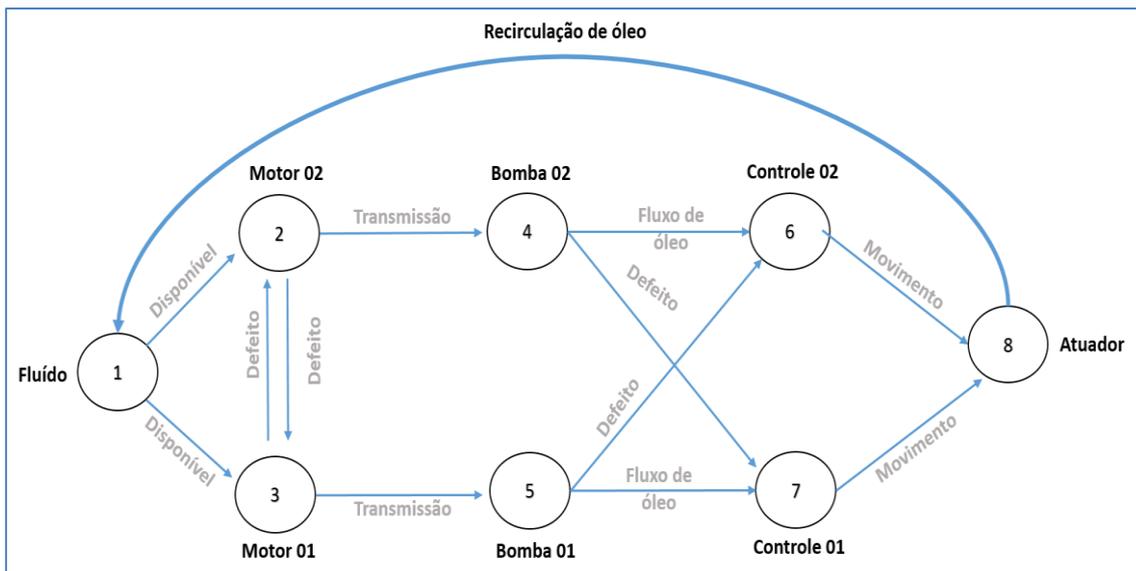


Figura 4.4 - Representação do esquema hidráulico carro através da cadeia de Markov.

O SH do carro representado pela cadeia de Markov na Figura 4.4 tem em sua concepção determinados componentes trabalhando em regime *standby* passiva nos pontos (2 e 3), (4 e 5), (5 e 6) e (4 e 7), ou seja, caso haja falha potencial ou funcional pode-se alterar de componente com interrupção mínima no processo com a perda do tempo apenas do *setup*, entretanto o fluido ponto (1) e o cilindro ponto (8) são singelos e falhas funcionais paralisam o sistema onde está incluso. O fluido hidráulico perpassa por todos os componentes e sempre retornando para um novo ciclo, sendo classificado como um circuito fechado.

Este sistema se caracteriza pelo alto nível de flexibilidade entre seus componentes, entretanto, pelo regime de trabalho da *standby* passiva, existe a peculiaridade da falha oculta, ou seja, quando esses componentes forem solicitados poderão estar em estado de falha.

Em relação ao sistema de fluido é sabido da sua interação com os demais componentes do circuito hidráulico, dessa forma o seu estado (temperatura, viscosidade, nível de impurezas) remetem a danos em cadeia, sendo possível modos de falhas em outros componentes por consequência do fluido.

O atuador como fim de linha está sujeito às consequências do estado do fluido assim como distúrbios, tais quais: picos de pressão, *sobre velocidade* no estágio nominal, rampas de desaceleração e desaceleração curtas, advindos do sistema de controles de válvulas.

### 4.1.3 - Análise das funções significantes do carro

Para entender e seleccionar as funções significantes faz-se necessário compreender os maiores impactos gerados operacionalmente para localizar os modos de falha predominantes do sistema ou subsistema. O direccionamento dos esforços para esses modos de falhas trará maior eficiência no processo final da MCC, pois de acordo SMITH e HINCHCLIFFE (2004) isso compreende aplicação do método de Pareto.

De acordo com o gráfico da Figura 4.5, abaixo, os maiores modos de falha são: falha no braço (39%), desarme de pressão (29%), desarme na UH (17%) e nível de óleo com 15%. As duas falhas predominantes equivalentes a 78% do total de horas de horas emergenciais.

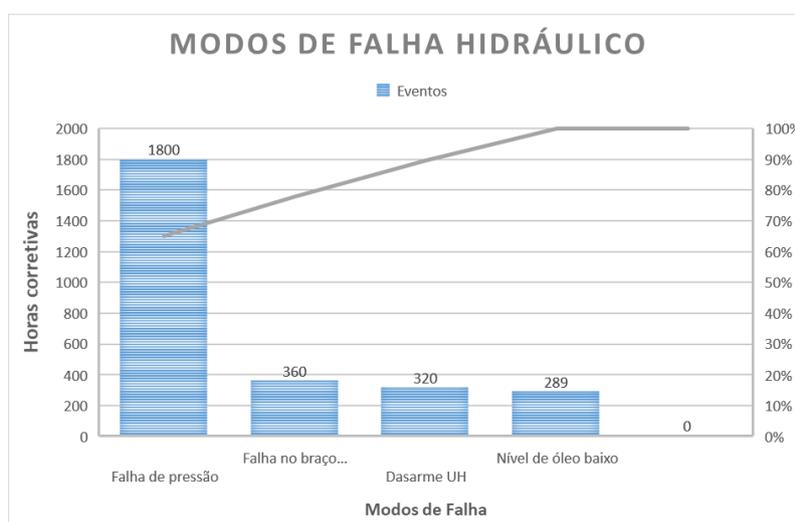


Figura 4.5 - Gráfico modos de falha carro empurrador.

As falhas relativas à pressão não necessariamente pertencem somente a um subsistema. Por exemplo, a falha de pressão pode ter origem em uma avaria numa bomba ou no carretel travado de uma válvula de ventagem e estes dois componentes do exemplo pertencem a subsistemas distintos, e, por isso a investigação deve partir a nível de componentes.

Então, de posse dessa informação é necessário entender qual função é significativa, tomando como base o impacto intolerável, excluindo funções atendidas por redundância, onde é necessário apenas realizar setup. Caso a falha, nesse caso específica, pertença a uma função significativa, então deverá atender ao critério de detectar falha oculta.

A Tabela 4.1, a seguir, é aplicada para selecionar as funções significantes de questionamentos binários sim ou não. Se um ou mais itens foram classificados como impacto essa função automaticamente é considerada significativa. A lógica da planilha é: se os questionamentos 1,2,3 forem sim; se o questionamento 4 for sim e o questionamento 5 for não; então será considerada uma função significativa. Abaixo a classificação:

Tabela 4.1 - Decisão de função significativa subsistema energia.

Função		Descrição da Função	
Função Principal		Transmitir energia através do fluido hidráulico	
Função Secundária (a)		Manter a temperatura interna em equilíbrio	
Função Secundária (b)		Lubrificação dos elementos móveis internos	
Questionamento	Funções	Respostas	
		Sim	Não
A perda da função gera efeitos intolerável em segurança e/ou, saúde e/ou meio ambiente ?	Primária		X
	Secundária (a)		X
	Secundária (b)		X
A perda da função gera efeitos intoleráveis na operação e nos ativos?	Primária	X	
	Secundária (a)	X	
	Secundária (b)	X	
A perda da função tem impactos significativo econômico para a empresa?	Primária		X
	Secundária (a)		X
	Secundária (b)		X
Esta função protegida por alguma tarefa existente de manutenção?	Primária	X	
	Secundária (a)	X	
	Secundária (b)	X	
Esta função protegida por algum sistema Standby existente?	Primária		X
	Secundária (a)		X
	Secundária (b)		X

Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2014)

Tabela 4.2 - Decisão de função significativa subsistema força.

Item	Função		Descrição da Função	
	Principal		Transformar energia mecânica em energia hidráulica	
	Questionamento	Funções	Respostas	
Sim			Não	
1	A perda da função gera efeitos intolerável em segurança e/ou, saúde e/ou meio ambiente ?	Primária		X
		Secundária (a)		X
		Secundária (b)		X
2	A perda da função gera efeitos intoleráveis na operação e nos ativos?	Primária	X	
		Secundária (a)	X	
		Secundária (b)	X	
3	A perda da função tem impactos significativo econômico para a empresa?	Primária		X
		Secundária (a)		X
		Secundária (b)		X
4	Esta função protegida por alguma tarefa existente de manutenção?	Primária	X	
		Secundária (a)	X	
		Secundária (b)	X	
5	Esta função protegida por algum sistema Standby existente?	Primária		X
		Secundária (a)		X
		Secundária (b)		X

Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2014).

Tabela 4.3 - Decisão de função significativa subsistema controle.

Item	Função		Descrição da Função	
	Função Principal		Aplicar movimentos no braço principal e auxiliar de forma controlada.	
	Função Secundária (a)		Controlar sobre capacidade máxima de pressão no sistema	
	Questionamento	Funções	Respostas	
Sim			Não	
1	A perda da função gera efeitos intolerável em segurança e/ou, saúde e/ou meio ambiente ?	Primária		X
		Secundária (a)		X
2	A perda da função gera efeitos intoleráveis na operação e nos ativos?	Primária		
		Secundária (a)		
3	A perda da função tem impactos significativo econômico para a empresa?	Primária		X
		Secundária (a)		X
4	Esta função protegida por alguma tarefa existente de manutenção?	Primária	X	
		Secundária (a)	X	
5	Esta função protegida por algum sistema Standby existente?	Primária		X
		Secundária (a)		X

Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2014)

Tabela 4.4 - Decisão de função significativa subsistema atuadores.

Item	Função		Descrição da Função	
	Principal		transformar energia hidráulica em energia mecânica através de movimentos de avanço e retração	
	Questionamento	Funções	Respostas	
			Sim	Não
1	A perda da função gera efeitos intolerável em segurança e/ou, saúde e/ou meio ambiente ?	Primária		X
2	A perda da função gera efeitos intoleráveis na operação e nos ativos?	Primária	X	
3	A perda da função tem impactos significativo econômico para a empresa?	Primária		X
4	Esta função protegida por alguma tarefa existente de manutenção?	Primária	X	
5	Esta função protegida por algum sistema Standby existente?	Primária		X

Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2014)

O subsistema energia, conforme Tabela 4.1, foi considerado como significativa porque ele paralisa o equipamento, conforme analisado no esquema hidráulico da Figura 4.4, e tem influência direta nos três modos de falha predominante do carro empurrador. Entretanto, apesar da cobertura por uma tarefa de manutenção, não existe um circuito *standby*.

O subsistema força Tabela 4.2 foi classificado como não significativa porque é atendido por sistema *standby* passivo e seu *setup* é tolerável, com paralização baixa da atividade. Além de não haver efeitos na segurança ou meio ambiente.

O subsistema controle Tabela 4.3 foi classificado como não significativo, pois é atendida por sistema *standby* e seu setup é tolerável com paralização baixa da atividade. E não há efeitos na segurança ou meio ambiente. O subsistema Atuador, exposto na Tabela 4.4, foi classificado como significativo, pois há impacto significativo na operação e não é atendido por sistema *standby*.

#### 4.1.4 - Interfaces internas e externas do giro e travas de vagões

Por razões técnicas de agrupamento esses dois sistemas serão analisados de forma conjunta, isto se deve pelo compartilhamento de dois subsistemas a esses dois sistemas. A divisão está explicitada pelo diagrama de interface na Figura 4.6:

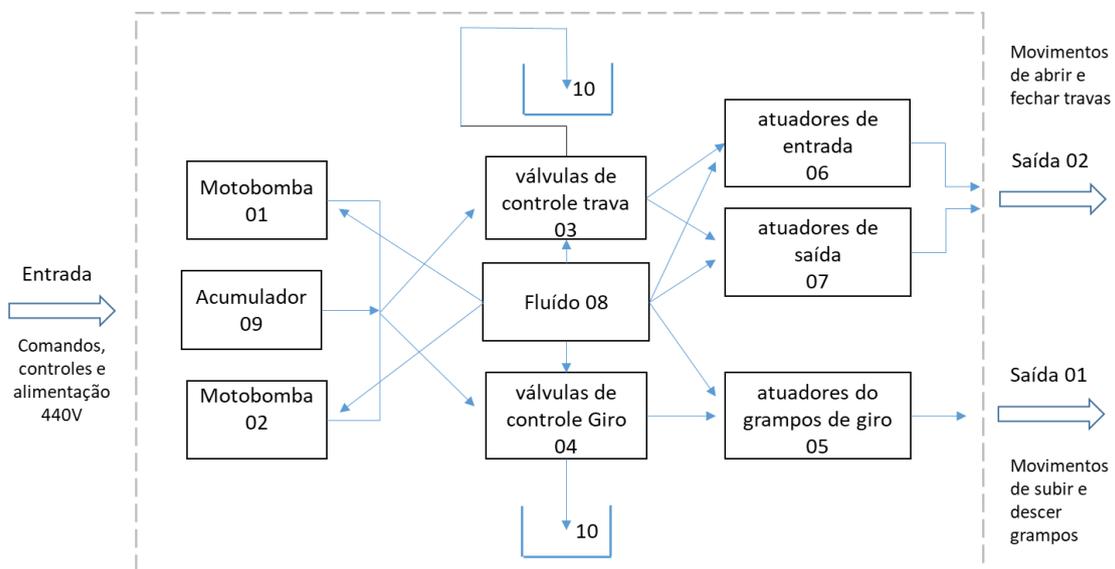


Figura 4.6 - Diagrama de interfaces e funcional do SH giro e carro empurrador.

- 1º (entrada) - O sistema da Figura 4.6 tem interface com outro sistema através do recebimento de sinal analógico e digital 24V para controles e 440V para comandos que são acionados quando há necessidade de movimentos ou necessita ficar em estado *standby*. De início ao fim do processo esse sistema gera anomalia em todos os subsistemas subseqüente;
- 2º - Ao receber comando o motor é acionado e automaticamente aciona a bomba hidráulica (01 e 02) que está no mesmo eixo gerando fluxo de fluido (08) no sistema de forma contínua, que são conduzidas através das tubulações e mangueiras para todo o sistema, ainda tem-se o acumulador (09) que auxilia as

bombas para garantir velocidade do fluido sem impactar na pressão. Até aqui, anomalias nesses componentes geram tanto no sistema grampo de giro quanto no sistema trava de vagões;

- 3º - A partir desse ponto o sistema passa a ser misto, isto porque o fluido divide para dois conjuntos de válvula de controle de sistemas distintos (4 e 3). Um conjunto de válvulas é do sistema trava de vagões (03) e o outro são os sistemas de válvulas dos grampos de giro (04), sendo que, a partir daqui as anomalias são diretamente ligadas a um único sistema.

Esses conjuntos de válvulas de controle são acionadas de forma orquestrada, restringindo o fluxo de óleo através das válvulas de ventagem gerando pressão nominal de 140 BAR no sistema, após as válvulas direcionais são acionadas direcionado o fluxo de óleo até o cilindro e em paralelo é pilotado outras válvulas de bloqueio e segurança para o sistema fique em harmonia e sobre monitoramento de velocidade, pressão e rampa de aceleração ou desaceleração, sendo que todo o excesso ou limites operacionais ultrapassados o fluido é descarregado para tanque item (10).

- 4º - O cilindro hidráulico (05, 06 e 07) é acionado de forma independente pelo fluxo de fluido gerando movimento de avanço ou retração com controle de velocidade e torque de acordo com o movimento operacional desejado;
- 5º Saída (01) - os grampos do giro sobem desatracando do vagão deixando-os livres para transladar e posicionar o próximo, ou abaixam atracando nos vagões de forma a permitir a giro destes para descarregar o material dentro deles na moega;
- Saída (2) - As travas fecham atracando no rodeiro do vagão evitando o deslocamento da composição de vagões no momento do giro ou abre as travas permitindo que a composição se desloque para posicionar os próximos vagões.

Observação: As travas de saída só entram em operação no último par de vagões a ser descarregado, pois nesse momento não há vagões na parte de entrada ao longo do braço, e sem vagões na entrada não é possível travá-los. Nesse momento os vagões estão todos na saída e a trava de entrada trava o vagão imediatamente posicionado logo após o giro.

#### 4.1.5 - Análise das funções significantes grampo e trava

De acordo com o gráfico da Figura 4.7 os maiores modos de falha são: falha de pressão (34%), falha grampo do giro (28%), desarme UH com (23%) e falha por nível de óleo com (16%). Dessa forma, essas falhas serão analisadas através do diagrama de decisão para entender quais subsistemas são intoleráveis caso ocorram falhas funcionais.

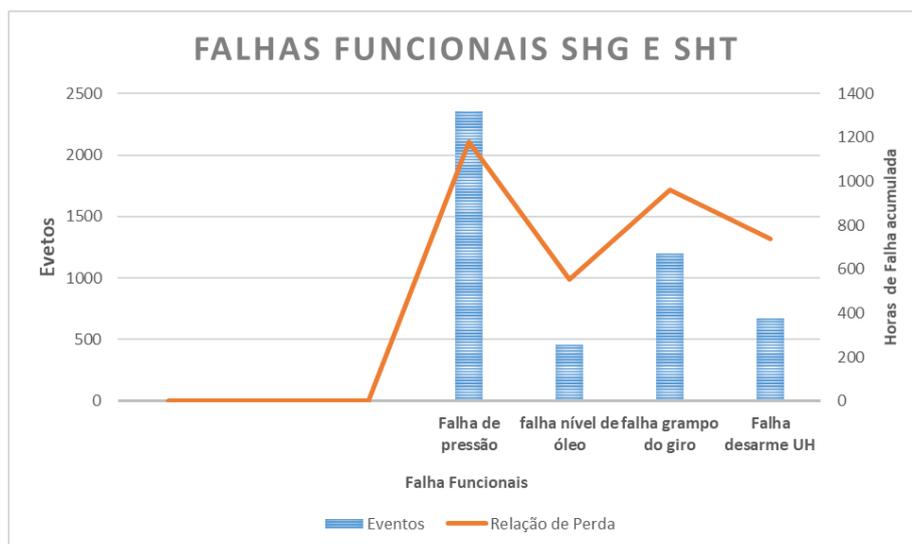


Figura 4.7 - Gráficos modos de falha grampo do giro e trava rodeiro.

A falha funcional de pressão é o modo de falha predominante e essa diferença é relativamente alta comparada aos demais modos de falha. Também cabe ressaltar que uma falha de pressão pode estar ligada a mais de um subsistema, porém não existe esse nível de dados disponíveis no histórico. Dessa forma será considerado a abrangência aos subsistemas possuidores de modos de falhas com causas potenciais.

As Tabelas 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 são aplicadas para selecionar as funções significantes de questionamentos binários sim ou não. Se um ou mais itens forem classificados como impacto essa função automaticamente é considerada significativa. A lógica da planilha é: se os questionamentos 1,2,3 forem sim; se o questionamento 4 for sim e o questionamento 5 for não; então será considerada uma função significativa. A seguir a classificação:

Tabela 4.5 - Decisão de função significativa subsistema energia do giro e trava.

Item	Função		Descrição da Função	
	Função Principal		Transmitir energia através do fluido hidráulico	
	Função Secundária (a)		Manter a temperatura interna em equilíbrio	
	Função Secundária (b)		Lubrificação dos elementos móveis internos	
	Questionamento	Funções	Respostas	
			Sim	Não
1	A perda da função gera efeitos intolerável em segurança e/ou, saúde e/ou meio ambiente ?	Primária		X
		Secundária (a)		X
		Secundária (b)		X
2	A perda da função gera efeitos intoleráveis na operação e nos ativos?	Primária	X	
		Secundária (a)	X	
		Secundária (b)	X	
3	A perda da função tem impactos significativo econômico para a empresa?	Primária		X
		Secundária (a)		X
		Secundária (b)		X
4	Esta função protegida por alguma tarefa existente de manutenção?	Primária	X	
		Secundária (a)	X	
		Secundária (b)	X	
5	Esta função protegida por algum sistema Standby existente?	Primária		X
		Secundária (a)		X
		Secundária (b)		X

Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2014).

Tabela 4.6 - Decisão de função significativa subsistema força do giro e trava.

Item	Função		Descrição da Função	
	Principal		Transformar energia mecânica em energia hidráulica	
	Questionamento	Funções	Respostas	
			Sim	Não
1	A perda da função gera efeitos intolerável em segurança e/ou, saúde e/ou meio ambiente ?	Primária		X
		Secundária (a)		X
		Secundária (b)		X
2	A perda da função gera efeitos intoleráveis na operação e nos ativos?	Primária	X	
		Secundária (a)	X	
		Secundária (b)	X	
3	A perda da função tem impactos significativo econômico para a empresa?	Primária		X
		Secundária (a)		X
		Secundária (b)		X
4	Esta função protegida por alguma tarefa existente de manutenção?	Primária	X	
		Secundária (a)	X	
		Secundária (b)	X	
5	Esta função protegida por algum sistema Standby existente?	Primária	X	
		Secundária (a)	X	
		Secundária (b)	X	

Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2014).

Tabela 4.7 - Decisão de função significativa subsistema controle do giro e trava.

Item	Função		Descrição da Função	
	Função Principal		Aplicar movimentos no braço principal e auxiliar de forma controlada.	
	Função Secundária (a)		Controlar sobre capacidade máxima de pressão no sistema	
	Questionamento	Funções	Respostas	
			Sim	Não
1	A perda da função gera efeitos intolerável em segurança e/ou, saúde e/ou meio ambiente ?	Primária		X
		Secundária (a)		X
2	A perda da função gera efeitos intoleráveis na operação e nos ativos?	Primária		
		Secundária (a)		
3	A perda da função tem impactos significativo econômico para a empresa?	Primária		X
		Secundária (a)		X
4	Esta função protegida por alguma tarefa existente de manutenção?	Primária	X	
		Secundária (a)	X	
5	Esta função protegida por algum sistema Standby existente?	Primária		X
		Secundária (a)		X

Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2014).

Tabela 4.8 - Decisão de função significativa subsistema atuadores do giro e trava.

Item	Função		Descrição da Função	
	Principal		transformar energia hidráulica em energia mecânica através de movimentos de avanço e retração	
	Questionamento	Funções	Respostas	
			Sim	Não
1	A perda da função gera efeitos intolerável em segurança e/ou, saúde e/ou meio ambiente ?	Primária		X
2	A perda da função gera efeitos intoleráveis na operação e nos ativos?	Primária	X	
3	A perda da função tem impactos significativo econômico para a empresa?	Primária		X
4	Esta função protegida por alguma tarefa existente de manutenção?	Primária	X	
5	Esta função protegida por algum sistema Standby existente?	Primária		X

Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2014).

Após a aplicação da tabela de decisão, ficou definido como função significativa os subsistemas energia e atuadores. Em relação a energia é devido a sua interface direta com todos os outros componentes e subsistemas onde esse subsistema está inserido, somado a isso ele não possuem linha de *standby* e conseqüentemente falhas funcionais afetam diretamente a operação. Sobre o subsistema atuadores este também não possui função *standby* e falhas funcionais afetam diretamente a operação, como ponto de observação é relativo à quantidade de cilindros por equipamento, pois no total são oito, e para os oito DVs tem a soma total de 64 cilindros.

De acordo com os autores NOWLAN e HEAP (1978), MOUBRAY (2001), RIBEIRO (2014), apenas as funções classificadas como significantes serão levadas aos próximos níveis de análise da MCC.

Este capítulo respondeu a primeira e segunda perguntas da MCC, sendo:

- 1º - quais são as funções e padrões desempenho associados, desejados, de desempenho do ativo na(s) função(ões) operacional(is) em seu contexto atual?
- 2º - de que forma eles podem falhar ao deixar de cumprir suas funções? (falha funcional).

## 4.2 - CLASSIFICAÇÃO DA CONSÊQUENCIA DA FALHA

Neste capítulo as funções definidas como significantes serão avaliadas através da FMEA, e seus modos de falhas serão classificados em relação às consequências das falhas funcionais e potenciais.

A FMEA deverá ser particionada em três partes segundo NOWLAN e HEAP (1978): primeiro, definindo os modos de falhas, seus efeitos e as causas; segundo, qualificando a consequência da falha segurança, meio ambiente, operacional e custo; terceiro, selecionando as atividades baseadas nas consequências e particularidades individuais.

A norma MIL-STD 1629A utiliza a FMECA ao invés de FMEA para o desenvolvimento da MCC. A diferença está na quantificação do fator de risco (NPR – Severidade x detectibilidade x frequência) pelo FMECA enquanto a FMEA é alicerçada na qualificação das consequências.

VINADÉ (2003) baseia a decisão de usar FMEA porque “quando a análise dos modos de falha e seus efeitos é direcionada para os objetivos da Manutenção Centrada na Confiabilidade, o RPN é suprimido pela classificação dos modos de falha quanto à segurança pessoal, desempenho operacional e economia”.

Para esse capítulo, em relação ao desenvolvimento e decisões técnicas de hidráulica, foram usadas apostilas de fabricantes, livros técnicos e dissertações voltados ao assunto para identificar e associar as principais causas e a correção dos modos de falhas potenciais e funcionais (SPERRY VICKERS, 1977; STEWART, 2014; CORREIA, 2018), Tecnologia Hidráulica Industrial (PARKER, 2018; VINADÉ, 2003; MITCHELL e PIPPENGER, 1997).

Isto porque, além das decisões técnicas a serem tomadas, verificou-se um detalhamento pouco robusto para histórico das ocorrências no sistema de gestão, onde há comentários superficiais como: “Descrição: bomba parou de gerar pressão; Solução: Foi trocada a bomba.”

Entretanto, é feito um tratamento de análise de falha (TAF) para eventos com duração acima de duas horas, como observado na Figura 4.8. São verificados os motivos, as causas e soluções. Esses processos são analisados por um engenheiro e técnicos do equipamento. Essas análises são apresentadas nas reuniões semanais de follow-up operacional. Neste sentido, eventos abaixo deste gatilho e sem impacto de segurança, meio ambiente e nos níveis operacionais, as decisões e ações ficam por conta de cada processo através dos técnicos inspetores do equipamento em sua rotina diária.

DI - Impacto 10/07 - VV8 – Vazamento UH Grampo – 4,75h					
09/07 – DI 86,47					
Motivo	Causa	Solução	Responsável	Prazo	STATUS
Rompimento do anel oring das tubulações da uh da trava de saída	Folga das fixações devido quebra do parafuso	Realizar troca dos parafusos de fixação das tubulações da trava de saída GMUD – Instalar válvula de esfera para individualizar as travas		31/07/2020	Em andamento
		Realizar levantamento dos parafusos de fixação dos flanges das tubulações das Uhs (Grampo e Posicionador)		31/07/2020	Em andamento
Folga das fixações devido quebra do parafuso	Tubulação está trabalhando (não está rígido)	Realizar codificação dos parafusos (Loja in Company) - PARKER		25/08/2020	Em andamento
Tubulação está trabalhando (não está rígido)	Chumbadores da estrutura de fixação está abilongado	Em avaliação da estrutural das fixações da tubulação		24/07/2020	Em andamento
<b>Ocorrência</b>					
-VV-311K-08Falha de nível baixo de óleo na unidade das travas e dos grampos. Foi identificado queda da referência de nível de óleo pelo overwll e identificado por mecânico do turno no campo uma grande quantidade de óleo. Verificado vazamento na tubulação da trava de saída lado direito.					
					

Figura 4.8 - Tratamento de análise de falha padrão.  
Fonte: Adaptado da EMPRESA (2020).

Então o levantamento dos modos de falhas foi realizado com base no histórico do sistema de gestão de eventos operacionais, histórico de TAF disparadas por gatilho e modos de falhas tradicionais relacionado aos componentes. Como os equipamentos estudados obedecem a um alto grau de padronização, ficou definido a replicação dos modos de falha de subsistemas semelhantes para os três sistemas, excluindo a análise da consequência da falha que deverá ser estudada individualmente.

Na Figura 4.9 será decidido sobre os subsistemas significantes que seguirão para a próxima etapa de classificação e entender as consequências da falha. Uma próxima

análise semelhante será realizada agora a nível de componente, onde é analisado a significância de cada modo de falha dos subsistemas significantes, verificando se é visível ou oculto e qual a modalidade de impacto, se é em segurança, meio ambiente, operacional ou custo.

NOWLAN e HEAP (1978) trouxeram uma abordagem de decisão de primeira camada trabalhando a falha oculta de forma independente e considerando iniciativas imediatas para as falhas de consequências de segurança e riscos operacionais.

Os modos de falha oculto foram considerados com um intervalo entre sua detecção e ações de correção. SMITH e HINCHCLIFFE (2004) usam essa abordagem proposta, entretanto correlacionam a falha oculta a uma das consequências supracitadas da seguinte forma: ela é oculta e caso ocorra leva a risco de segurança? ela é oculta e caso ocorra leva a riscos operacionais? ela é oculta e caso ocorra há um custo elevado? Para esta questão será utilizado a abordagem de SMITH e HINCHCLIFFE (2004).

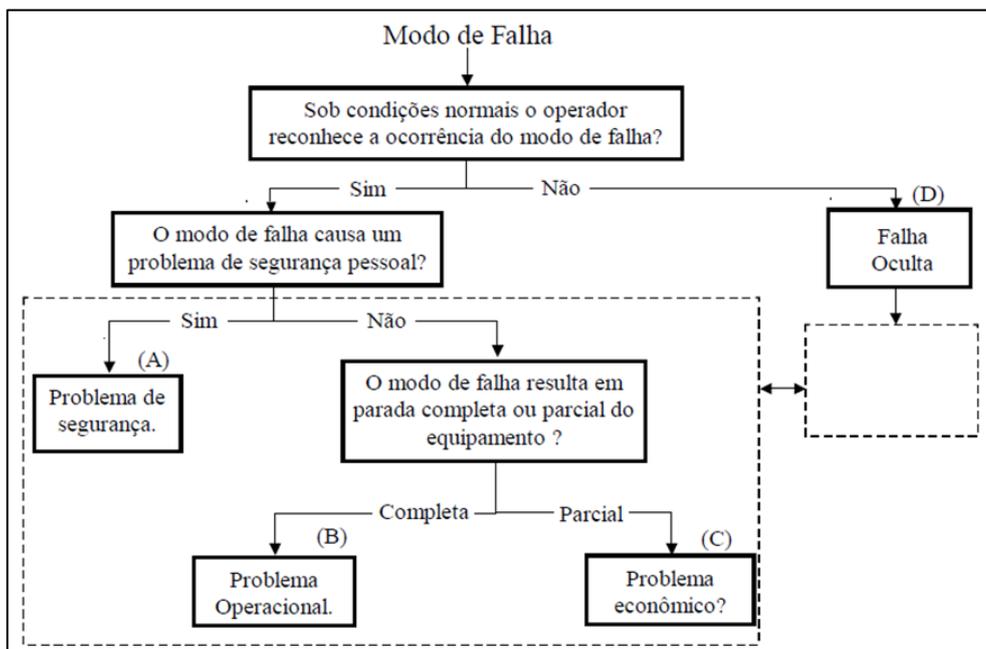


Figura 4.9 - Diagrama para selecionar a consequência para cada modo de falha. Fonte: VINADÉ *apud* (SMITH e HINCHCLIFFE 2004).

Os autores estabelecem a necessidade de gatilhos ou linhas de corte para determinar se é ou não tolerável cada variável em questão e é estabelecida as seguintes classificações para os modos de falha: A - Modos de falha com consequências de segurança e meio ambiente; B - Modos de falha com consequências na operação; C - Modos de falha com consequências econômicas; D/A - Modos de falha oculto com

consequência de segurança; D/B - Modos de falha oculto com consequência operacional; D/C - Modo de falha oculto com consequência econômica.

A prioridade prevalecerá na seguinte ordem: primeiro, falhas classificadas como A ou D/A; segundo, falhas classificadas como B ou D/B; terceiro, falhas classificadas como C ou D/C. Os resultados estão dispostos na tabela da Figura 5.1, a seguir:

## CAPÍTULO 5

### CONSEQUENCIA DA FALHA DO CARRO, GRAMPO E TRAVA DE ENTRADA

Para a primeira parte foi realizado o levantamento dos modos de falhas, seus efeitos e causas prováveis. O quadro exposto na Figura 5.1, a seguir, representa os três sistemas com 14 modos de falhas e 32 causas. A coincidência não é casual e deve-se ao alto nível de padronização do sistema.

Subsistema	Componente	Função	Modo de falhas	Efeito da Falha	Causas			
Energia	Tubulação	Escoar o fluido hidráulico	Folga dos parafusos dos flanges	Perda de fluido para ambiente	1. Excesso de vibração 2. Execução fora de procedimento 3. Material fora de especificação			
				Perda dos movimentos				
			Trincas em soldas de ligação e flanges	Perda de fluido para ambiente	1. Excesso de vibração 2. Solda com baixa qualidade 3. Desalinhamento de juntas			
				Perda dos movimentos				
			Rompimento de O'ring	Perda de fluido para ambiente	1. Cavitação 2. Material fora de especificação 3. Montagem fora de procedimento 4. Excesso de vibração			
				Perda dos movimentos				
			Rompimento da malha da mangueira	Perda de fluido para ambiente	1. Alto nível de contaminates sólidos 2. Cavitação 3. Pressão elevada no sistema 4. Montagem fora de procedimento 5. Material fora de especificação			
				Perda dos movimentos				
			Energia	Filtro	Reter partículas com granulometria não aceitáveis	Entupimento	Aumento de pressão interna	1. Saturação da malha do Filtro 2. Especificação incorreta do filtro 3. Reposição de óleo com alto índice de contaminação
							Contrapressão de óleo	
							Perda de movimentos	
						Deteriorização da malha filtrante	Contaminação do fluido	1. Vazão elevada de fluido 2. Pressão elevada do sistema 3. Deformação da malha filtrante
Travamento de elementos móveis do circuito hidráulico								
Malha do filtrante fora de especificação	Travamento de elementos móveis do circuito hidráulico	1. Erro de Projeto 2. Erro fornecimento de material						
	Contaminação do fluido							
	Perda de movimentos							
Energia	Fluido Hidráulico	1. Transmitir energia hidráulica 2. Lubrificar partes móveis				Temperatura elevada	Desarmes Constantes no circuito	1. Saturação da malha do filtro 2. Vazão elevada do fluido 3. Reações químicas por alteração das características 4. Alteração da viscosidade
			Alteração da viscosidade					
			Vazamentos					
			Perda da Função Lubrificante					
			Contaminação por água	Perda de rendimento	1. Não filtragem do óleo novo antes de abastecer Unidade Hidráulica 2. Falta de proteções contra interperes e limpezas manuais 3. Filtro de ar saturado 4. Reações químicas por alteração das características			
				Entupimento de partes móveis do circuito				
				Perda da Função Lubrificante				
			Perda de aditivos	Perda da função lubrificante	1. Reações químicas por alteração das características 2. Vazão elevada do fluido 3. Não filtragem do óleo novo antes de abastecer Unidade Hidráulica			
				Aumento acentuado de oxidação				
				Vazamentos				
			Atuadores	Cilindro	Transformar energia hidráulica em energia mecânica	Passagem interna entre camaras	Perda de torque	1. Desgaste nos anéis do pistão 2. Ranhuras na camara 3. Vazão elevado do Fluido somada a temperatura elevada
							Perda dos movimentos	
Cizamento da haste	Perda dos movimentos	1. Solicitações de carga acima da capacidade de carga 2. Trincas por fadiga do material 3. Desgaste da rosca haste e munhão						
	Vazamentos							
Deformação nas retenções	Perda de torque	1. Ressecamento do material 2. Montagem errada da retenção 3. Temperatura alta do fluido 4. Desgaste na superfície 5. Material fora de especificação						
	Perda dos movimentos							

Figura 5.1 - Análise dos modos de falhas, efeitos e causas carro empurrador, grampo do giro e trava de rodeiro.

Com os resultados da primeira parte, então o próximo passo foi classificar os modos de falha em relação as suas consequências e mostrado na Tabela 5.1, para o sistema carro empurrador, e na Tabela 5.2, para o sistema grampo do carro e trava do rodeiro, ambas a seguir. No sistema carro houve duas classificações como A e D/A, seis com classificação B e D/B e dois com classificação C. No sistema grampo e trava foram 7 classificadas com B ou D/B e 5 como C ou D/C.

As diferenças entre os três sistemas ficaram por conta dos modos de falha categoria A e D/A existentes somente no SHC, apesar dos sistemas serem semelhantes com os mesmos modos de falha. Isto é explicado pelas condições físicas de instalação no que diz respeito a acesso, porque quando em operação não há possibilidade de pessoas adentrarem neste espaço e numa ocorrência os cilindros residuais do sistema não permitem acidentes materiais e vale a mesma dinâmica para a trava do rodeiro.

Tabela 5.1 - Classificação das consequências dos modos de falha carro empurrador.

Componente	Modo de falhas	Condição	Consequência	Classificação	Severidade	Detecibilidade	Ocorrência	Fato de Risco
Tubulação	Folga dos parafusos dos flanges	Visível	Operacional	B	3	2	5	30
	Trincas em soldas de ligação e flanges	Visível	Operacional	B	3	3	3	27
	Rompimento de O'ring	Oculto	Segurança	A	3	4	7	84
	Rompimento da malha da mangueira	Oculto	Operacional	B	3	4	1	12
Filtro	Entupimento	Visível	Operacional	B	1	4	7	28
	Deteriorização da malha filtrante	Oculto	Operacional	D/B	2	4	3	24
	Malha do filtrante fora de especificação	Visível	Operacional	B	2	1	3	6
Fluido Hidráulico	Temperatura elevada	Visível	Operacional	B	2	1	7	14
	Contaminação por água	Oculto	Operacional	D/C	2	3	5	30
	Perda de aditivos	Oculto	Operacional	C	2	3	3	18
Cilindro	Passagem interna entre camaras	Oculto	Operacional	D/B	2	3	3	18
	Cizamento da haste	Oculto	Segurança	A	4	4	3	48
	Deformação nas retenções	Visível	Operacional	C	2	4	3	24

Tabela 5.2 - Classificação das consequências dos modos de falha grampo e trava.

Componente	Modo de falhas	Condição	Consequência	Classificação	Severidade	Detecibilidade	Ocorrência	Fato de Risco
Tubulação	Folga dos parafusos dos flanges	Visível	Operacional	B	3	2	5	30
	Trincas em soldas de ligação e flanges	Visível	Operacional	B	3	3	3	27
	Rompimento de O'ring	Oculto	Segurança	B	3	4	7	84
	Perda de secção do material	Oculto	Operacional	D/B	3	4	1	12
Filtro	Entupimento	Visível	Operacional	C	2	3	5	30
	Deteriorização da malha filtrante	Oculto	Operacional	D/B	2	4	3	24
	Malha do filtrante fora de especificação	Visível	Operacional	C	2	1	3	6
Fluido Hidráulico	Temperatura elevada	Visível	Operacional	B	2	1	7	14
	Contaminação por água	Oculto	Operacional	D/C	2	3	5	30
	Perda de aditivos	Oculto	Operacional	C	2	3	3	18
Cilindro	Passagem interna entre camaras	Oculto	Operacional	D/B	2	3	3	18
	Cizamento da haste	Oculto	Segurança	B	4	4	3	48
	Deformação nas retenções	Visível	Operacional	C	2	4	3	24

Nesse capítulo foi respondida a questão quatro da MCC, “quais as consequências de uma falha funcional?”. O próximo item dará sequência à quinta, sexta e sétima questão, com a proposta das atividades e efetividade voltadas a eliminar os modos de falha ou atenuar as consequências das falhas.

### 5.1 - SELEÇÃO DE TAREFAS DE MANUTENÇÃO

Neste item serão respondidas as questões 5, 6 e 7 da MCC, pois será decidido quais as técnicas de manutenção a serem adotadas para cada modo de falha. As tarefas dividem-se em proativas (preditiva, inspeção, preventiva por restauração, manutenção preventiva por descarte) ou default (reprojeto, manutenção corretiva ou detectiva). Complementando esta lógica, a norma SAE JA 1011(1999) diz que: “a probabilidade condicional de alguns modos de falha crescerá com a idade ou exposição ao esforço, de que a probabilidade condicional de outros modos não mudará com a idade, e de que a probabilidade condicional de alguns outros decrescerá com a idade”.

Para modelagem e aplicação de distribuição de confiabilidade como lognormal e Weibull em um sistema é necessário um conjunto mínimo de dados estruturados e confiáveis para que os resultados sejam consistentes, e, suportem as decisões tomadas.

Neste contexto o interesse é nos dados que representem os eventos ocorridos com componentes atrelado a uma linha do tempo, como mostra gráfico da Figura 5.1. O gráfico apresenta a seguinte lógica: as amostras 01, 02, 03 e 04 são componentes novos e idênticos. Ao iniciar a operação as amostras 01, 02, 03 e 04 falham com 30, 40, 50 e

60 horas respectivamente. A partir de então, com um conjunto de dados estruturados com essa modelagem é possível transformar em análise estatística.

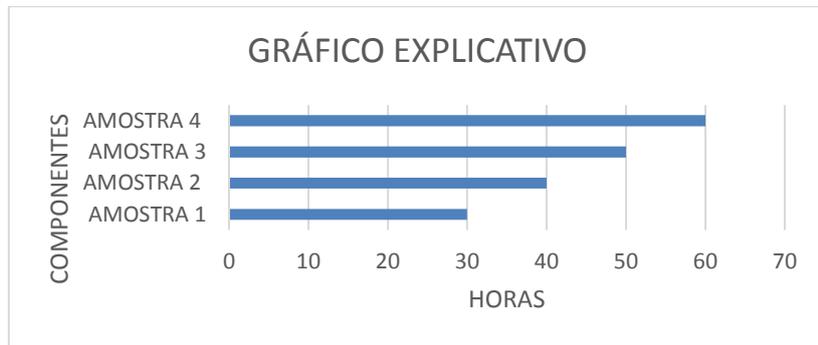


Figura 5.2 - Estruturação de dados necessários para análise de confiabilidade.

Houve uma dificuldade em relação a dados estruturados de tal forma que atendam as premissas de uma análise quantitativa, porque é necessário um inventário histórico a nível de componente. A Figura 5.3 mostra os parâmetros de informações encontradas ao longo do desenvolvimento desse trabalho, inviabilizando a análise quantitativa de alguns componentes, sendo realizado a análise somente qualitativa.

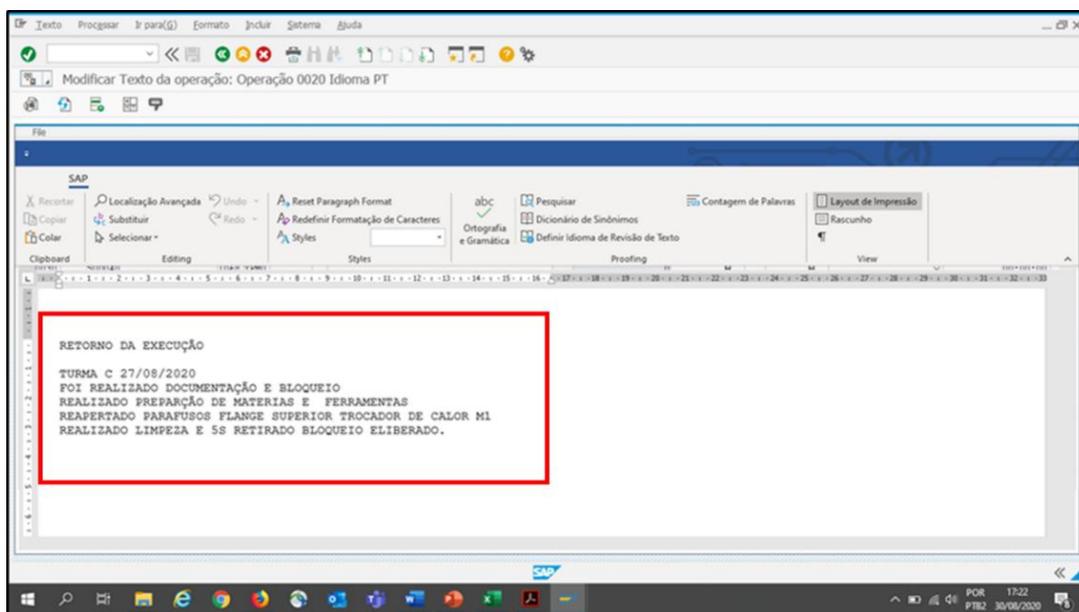


Figura 5.3 - Retorno de uma atividade emergencial do equipamento.

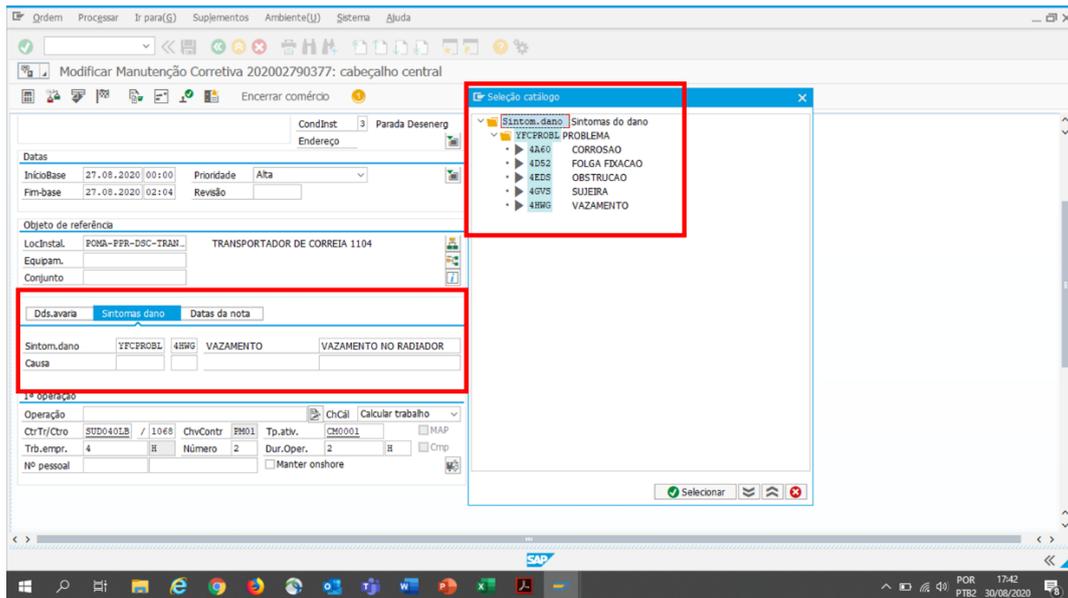


Figura 5.4 - Retorno de uma atividade emergencial do equipamento.

Fonte: Adaptação DESENHO MINERADORA (2020).

A planilha de decisão Figura 5.4, sugerido por MOUBRAY (2001) mostra o caminho a ser percorrido numa sequência lógica e racional para a seleção de uma tarefa de manutenção. Respeitando o foco em deliberar primeiramente ações proativas optando por tarefas *default* em última instância. Assim cada modo de falha será analisado a luz dessa planilha.

A lógica é, ao determinar qual a tarefa adequada para cada modo de falha, conforme Figura 5.5, a sua frequência é deliberada através da curva de falha do equipamento, entretanto como exposto neste capítulo, a necessidade de um conjunto de dados organizados, para tanto, na ausência desses dados consistentes será considerado o preenchimento da FMEA.

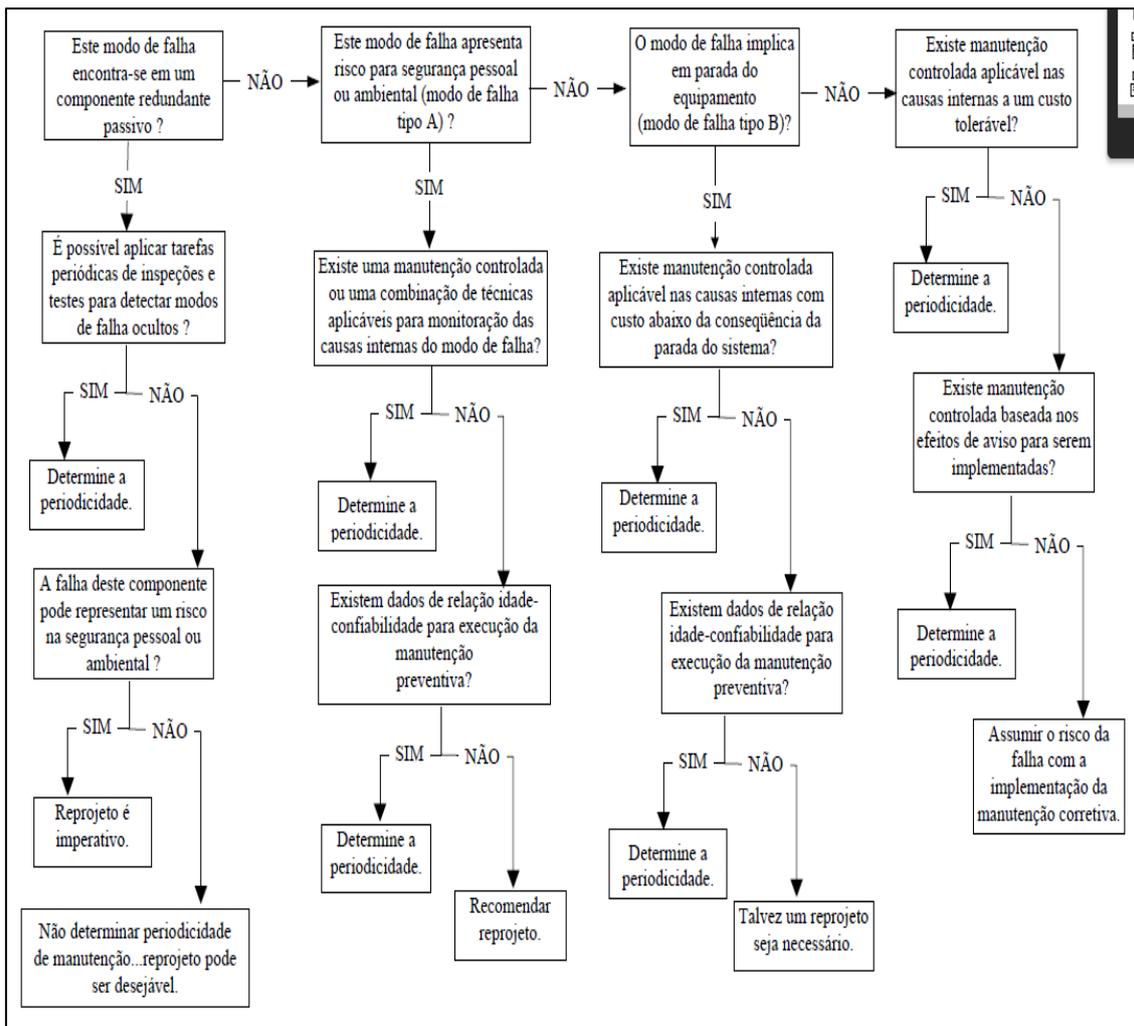


Figura 5.5 - Diagrama de definição de tarefas de manutenção através de diagrama lógico.

Fonte: VINADÉ (2003).

### 5.1.1 - Cilindros

Os cilindros utilizados são de dupla ação com amortecimento, trabalham com pressão nominal de 140 BAR e diferem entre si pela dimensão e capacidade de carga. No SHC a conexão traseira é frontal tipo articulada e montada por pinos e rolamento, já no SHG e SHT são pinos nas duas pontas, conforme Figura 5.6.

Eles possuem um bloco acoplado responsável pela distribuição do fluído bem como seu selamento através de válvula de bloco pilotada. No SHC são aplicados dois cilindros um no braço principal e outro no braço auxiliar. No SHG são aplicados o total de oito cilindros, sendo um em cada grampo. Por último no SHT utiliza-se oito, sendo quatro na trava de entrada e quatro na trava de saída.



Figura 5.6 - Cilindros do carro empurrador.  
Fonte: VALE.

Um avanço e um retorno do cilindro são considerados um ciclo e no descarregamento de um lote é realizado 220 ciclos. Em média por dia são descarregados 8 lotes, então em média é realizado 1760 ciclos em cada cilindro diariamente.

Para análise de densidade foram consideradas as falhas ocorridas nos oito carros empurradores e calculado através da distribuição de Weibull:

$I = n^\circ$  de elementos

$X = \text{Média} = \ln \sum x/i$

$S^2 = \text{Variância} = \left(\frac{1}{i-1}\right) + (\ln n - x)^2$

$S = \text{Desvio padrão} = \sqrt{S^2}$

$\beta = \left(\frac{pi}{S}\right) * \sqrt{6}$

$\alpha = \exp\left(x + \left(\frac{0,5772}{\beta}\right)\right)$

$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right]$

$Tp = \text{Probabilidade de falha de } p \text{ unidades} = \alpha * (\ln 1 - p)^{\frac{1}{\beta}}$

Logo:

$I = 13;$   
 $S^2 = 0,066959;$   
 $S = 0,258764;$   
 $\beta = 29,73863;$   
 $\alpha = 4255,17.$

O comportamento está disposto no gráfico da Figura 5.7 abaixo, e representa a probabilidade em % de falha dos equipamentos no tempo (t). É possível perceber uma probabilidade de falha inicial entre 1000 e 1500 horas trabalhadas e uma concentração a partir de 3500 horas mostrando uma razão ligada direta ao tempo.

A estratégia adotada em casos de falhas atualmente é a troca do componente, pois não é viável tecnicamente sua recuperação. A troca emergencial tem média 6 horas e atualmente existe uma substituição preventiva com frequência de 8 meses. Por se tratar de uma consequência com cunho de segurança o foco é nas amostras não sobreviventes, ficando os dados censurados descartados dessa análise.

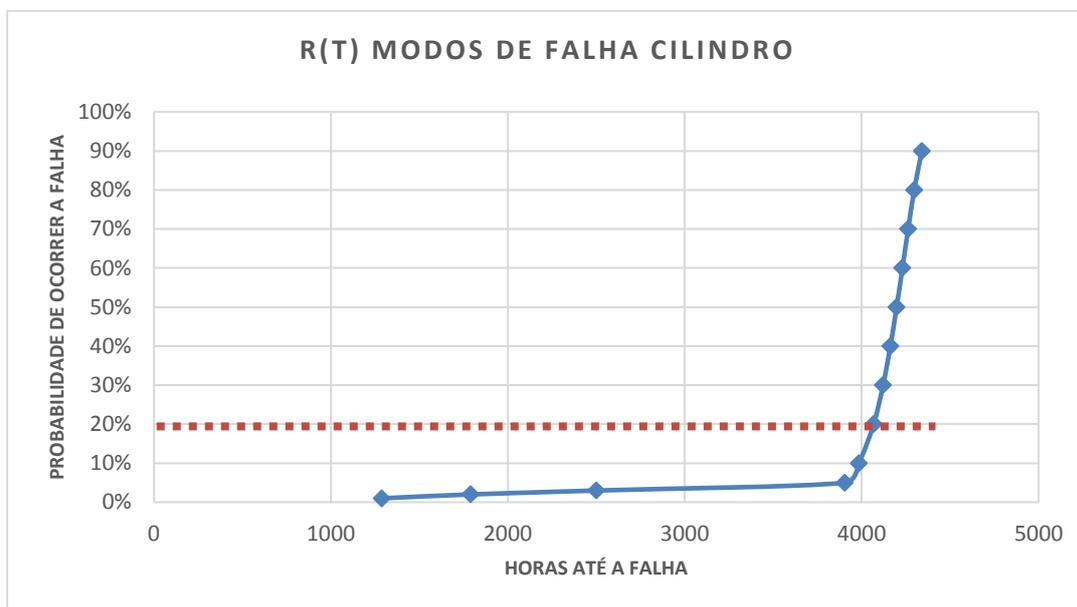


Figura 5.7 - H(t) do carro empurrador dos descarregadores.

Os dados foram sintetizados e extrapolados para o preenchimento do diagrama de decisão para cada modo de falha. A estratégia é otimizar e cadenciar as tarefas em ciclos de intervenções mínimas de 42 dias. A dinâmica para este passo e os demais foi a discussão com o engenheiro e técnicos responsáveis pelo equipamento para decidir qual a alternativa mais adequada, os resultados seguem na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Planilha com proposta da política de manutenção para cilindros do carro (SHC).

<b>Equipamento:</b> Descarregadores de Vagões	<b>Analista:</b> Wemerson Almeida	<b>Equipe:</b> MCC					<b>Data:</b> 20/06/2020	<b>Nº do documento:</b>	
<b>Função:</b> transformar energia hidráulica em energia mecânica		<b>Sistema:</b> Carro Empurrador					<b>Subsistema:</b> Atuadores		
Modo de Falha	Efeitos	Classificação da Consequência						Tarefa Proposta	Frequência
		A	B	C	D/A	D/B	D/C		
Passagem interna entre camaras	Perda de torque				X			1) Substituição Preventiva 2) Inspeção Detectiva	1) 175 dias 2) 42 dias
	Perda dos movimentos								
Cizamento da haste	Perda dos movimentos		X					1) Reprojeto	*****
Deformação nas retenções	Vazamentos			X					
	Perda de torque								

Para o cilindro foi proposto manter a substituição preventiva, mas com a revisão da frequência para 175 dias, baseado na curva de falha respeitando 20% de probabilidade de as amostragens falharem. A tarefa detectiva foi sugerida com intervalo de 42 dias, ou seja, no mesmo ciclo de paradas operacionais do equipamento, porque trata-se de uma falha oculta e é possível realizar teste de gravidade com o cilindro, onde o mesmo é colocado a 45° e desligado a UH, com isso se houver passagem interna este baixará pela gravidade de forma lenta até chegar a 0°.

Para o modo de falha cisalhamento, este requer reprojeto, tendo em vista que nenhuma tarefa tem efetividade e garantias e por se tratar de um item com consequências de segurança. Em meio a elaboração desde projeto, este item já foi reprojeto pela empresa, porém não substituído em sua totalidade.

Sobre o modo de falha deformações na retenção, não foram propostas tarefas ou alteração nas existentes [U1] porque trata-se de um impacto somente sobre os custos e porque a falha é visível sendo monitorada pela tarefa de inspeção funcional com frequência de sete dias já existente. Como mostra a observação 3 da Figura 5.7 os vazamentos extrapolam para o ambiente. Outro ponto a considerar é prover um maior controle sobre a qualidade do fluido porque a ausência de lubrificante das partes móveis do cilindro bem como o excesso de granulados afeta sua confiabilidade, este será tratado nos itens à frente no componente fluido.

Para os cilindros do SHG e SHT não foi possível análise de estatística e probabilidade de dados devido a censura dos dados, então as decisões para estes após a análise qualitativa da FMEA e planilha de decisão da Tabela 5.4, seguem as mesmas sugeridas para os cilindros do SHC.

Tabela 5.4 - Planilha com proposta da política de manutenção para cilindros do giro e trava.

<b>Equipamento:</b> Descarregadores de Vagões		<b>Analista:</b> Wemerson Almeida		<b>Equipe:</b> MCC			<b>Data:</b> 20/06/2020		<b>Nº do documento:</b>		
<b>Função:</b> transformar energia hidráulica em energia mecânica				<b>Sistema:</b> Carro Empurrador				<b>Subsistema:</b> Atuadores			
Modo de Falha	Efeitos	Classificação da Consequência						Tarefa Proposta	Frequência		
		A	B	C	D/A	D/B	D/C				
Passagem interna entre camaras	Perda de torque			X				1) Substituição Preventiva 2) Inspeção Detectiva	1) 175 dias 2) 42 dias		
	Perda dos movimentos										
Cizamento da haste	Perda dos movimentos		X					1) Reprojeto	*****		
Deformação nas retenções	Vazamentos			X							
	Perda de torque										

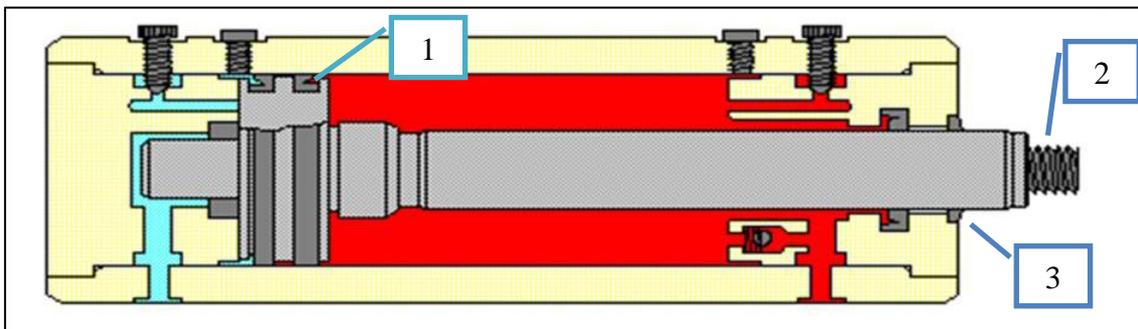


Figura 5.8 - Desenho típico de cilindro dupla ação com amortecimento.  
Fonte: CEFET – BA.

### 5.1.2 - Fluido

O componente fluido é o mais complexo em termos das causas diretas, isto porque ele percorre por todos os componentes do circuito, e por muitas vezes a causa da falha em outro componente de outro subsistema é advindo do fluido, somado a isso, o conjunto de dados disponíveis não são suficientes para gerar uma análise de estatística porque nas intervenções ocorridas não há uma análise estruturada das mesmas a não ser se esta falha ultrapassar o gatilho de tolerância.

Então, o estudo para fluidos será baseado no diagrama de decisão Figura 5.5 (Diagrama de definição de tarefas de manutenção através de diagrama lógico), e será considerada a implementação para ambos os três sistemas hidráulicos, outra questão é relativo a dimensão deste item, são exatos 46.800 litros de óleo nos oito DVs e decisões devem ser ponderadas também sobre esse fator. A planilha da Tabela 5.5, a seguir, sugere cinco tarefas, entre novas ou com necessidade de revisar, para cada modo de falha, sendo detalhada, também a seguir.

Tabela 5.5 - Planilha com proposta da política de manutenção para fluidos.

Equipamento: Descarregadores de Vagões		Analista: Wemerson Almeida		Equipe: MCC			Data: 21/06/2020	Nº do documento:	
Função: transmitir energia através do fluido hidráulico,		Sistema: Carro empurrador, Grampo do giro e trava de rodeiro			Subsistema: Energia				
Modo de Falha	Efeitos	Classificação da Consequência						Tarefa Proposta	Frequência
		A	B	C	D/A	D/B	D/C		
Alteração da viscosidade	Desarmes Constantes no circuito							Inspeção Condicional (análise d óleo)	1) 84 dias
	Alteração a temperatura					X			
	Vazamentos								
	Perda da Função lubrificante								
Contaminação por água	Perda de rendimento							1) Reparo Preventiva 2) Inspeção Condicional (análise d óleo)	1) 124 dias 2) 84 dias
	Entupimento de partes móveis do circuito					X			
	Perda da Função lubrificante								
Perda de aditivos	Perda da função lubrificante							1) Inspeção Condicional (análise d óleo)	1) 124 dias
	Aumento acentuado de oxidação					X			
	Vazamentos								

Segundo STACHOWAK e BATCHELOR (1993) *apud* MOREIRA (2015) a viscosidade “é uma propriedade física que varia de acordo com a temperatura, a taxa de cisalhamento e a pressão a que estão submetidos os óleos lubrificantes”. Neste sentido a harmonia de trabalho do sistema hidráulico terá a maior influência sobre esse fenômeno que pode ser temporário ou definitivo a depender do seu estágio de degradação das suas propriedades químicas.

Em todo o fluido recebido pela empresa, desde a chegada no almoxarifado central até a instalação, não são feitos testes ou inspeção para analisar a viscosidade real. Neste sentido, sugere-se manter a análise de óleo, porém alterá-la para 84 dias, isto porque em média o resultado da análise é de 5 dias úteis o que garante, caso haja anomalias do fluido, 37 dias para o planejamento e execução na próxima parada operacional preventiva e somente alterações severas geraram falhas funcionais.

Em relação contaminação por água, há três vertentes: a primeira seria o próprio produto *standard*, com medidas de contaminação acima do permitido por razões operacionais, ou mesmo de armazenamento ao longo da cadeia de suprimentos e logística; em segundo, poderá ser por contaminação no momento do abastecimento do

sistema; e por último, as condições físicas do equipamento, como proteções, tampas vedantes que não são corretamente instaladas, deixam suscetível à entrada de água e outros contaminantes advindos do processo de limpeza, ou mesmo à intempéries.

Nesse sentido fica como a sugestão manter a inspeção condicional de análise de óleo alterando para 84 dias e a reparação de preventiva com a atividade de filtragem do fluido e limpeza interna do tanque ao abastecer com óleo novo e após seguir a cadência de 124 dias ou 3 ciclos de parada.

Em relação a perda de aditivos, KOH e BUTT (*apud* MOREIRA, 2015) dizem que os aditivos têm a responsabilidade de controlar os radicais livre e peróxidos responsáveis pela oxidação do óleo, considerada uma anomalia natural de óleos minerais. Dessa forma, a perda de aditivos acelera o processo de oxidação do fluido levando a perda das propriedades químicas essenciais.

Essas perdas estão ligadas ao tempo em operação e as exigências operacionais acelerando ou não esse processo. Então por todo esse contexto sugere-se inspeção condicional por análise de óleo a cada 124 dias, entretanto esta ação será suprida pela tarefa destacada para o modo de falha contaminação por água, ficando assim por questões de otimização 84 dias ou dois ciclos de parada.

### **5.1.3 - Filtros de óleo**

Os filtros têm a função de reter os contaminantes acima do permitido em um sistema evitando a transmissão desses particulados através do fluido para os demais componentes do circuito. Existe dois tipos de filtros aplicados nos DVs: o primeiro são filtros de alta pressão nominal de 160 BAR, o segundo são os filtros de linha para retorno que trabalham com pressão nominal de 60 bar. Os filtros para linha de alta pressão são fabricados com materiais mais robustos devido à alta exigência e com isso os custos são mais elevados, ao contrário os filtros de retorno têm custos menores.

Estes filtros são descartáveis e por isso não devem ser reaproveitados, em relação a capacidade de retenção, suas malhas de filtragem podem chegar as dimensões até 4 micron, conforme a Tabela 5.6. Geralmente não acompanham sensores de saturação, mas há disponíveis medidores de partículas on-line com possibilidade de instalação no próprio equipamento e fornecendo instantaneamente o nível de particulados no sistema, esse sistema permite mudar a classificação da falha de oculta para visível.

Tabela 5.6 - Tabela nível de saturação.

Faixa	Mícron	Faixa de contagem
19	4+	2,500 - 5,000
16	6+	320 - 640
13	14+	40 - 80

Fonte: APOSTILA PARKER (2020).

A norma ISSO 4406 (1999) estabelece os limites máximo de contaminantes para uma porção de 100ml de fluido. A Tabela 5.6 mostra por classe os limites máximos aceitáveis para os DVs, onde a primeira coluna é a classificação por classe das partículas, nesse caso 19, 16 e 13; na segunda coluna apresenta as dimensões volumétricas das respectivas partículas; e, a terceira coluna expõe a concentração máxima desejável para uma porção de 100ml.

Para o modo de falha entupimento e deterioração da malha filtrante foi sugerido rever a frequências da tarefa substituição preventiva dos atuais 180 dias para 124 dias, ou seja, três ciclos de manutenção, pois não há pelo fabricante uma medida exata baseada em alguma medida como tempo, horas, ciclos, etc. Por isso a decisão cabe ao setor de manutenção de acordo com o contexto operacional e histórico quando houver.

Para atender a este requisito deverá adequar a malha de suprimentos para atender a demanda de 72 filtros a cada três ciclos de manutenção, entendendo que deverá ser replicado a oito DVs. Em cinco dos oito DVs existem medidores de partículas no sistema do grampo de giro e trava de rodeiros, porém não é utilizado pela inspeção funcional como parâmetro, fora isso, notou-se que não há serviços de aferição para conferir seu grau de desvio numa frequência pré-definida.

Então é proposto criar uma restauração funcional nestes equipamentos de apoio e replicar para os outros três viradores faltantes, fora isso, ligá-los diretamente ao sistema de instrumentação da máquina para que os alarmes possam ser disparados e percebido pelo operador ou agente da manutenção, com isso alterando a característica da falha de oculta para visível.

Em relação à especificação da malha filtrante é sugerido uma análise pela engenharia de potenciais fabricantes e determinar quais desses tem condições técnicas de fornecer filtros, principalmente de alta pressão, com a qualidade e confiabilidade esperada. Pois foi verificado em entrevista com o técnico do equipamento e confirmado com o engenheiro onde houve casos de filtros trocados de determinados fornecedores onde obtiveram baixa confiabilidade ao ponto de rodar algumas horas. Isto é percebido pela miscelânea de filtros com fabricantes diferentes para uma mesma aplicação.

Tabela 5.7 - Planilha com proposta da política de manutenção para fluidos.

Equipamento: Descarregadores de Vagões		Analista: Wemerson Almeida		Componete: Filtro			Data: 10/06/2020	Nº do documento:	
Função: Reter partículas granulométricas acima do permitido			Sistema: Carro Empurrador				Subsistema: Energia		
Modo de Falha	Efeitos	Classificação da Consequência						Tarefa Proposta	Frequência
		A	B	C	D/A	D/B	D/C		
Entupimento	Aumento de pressão interna							1) Substituição Preventiva	1) 126 dias
	Contrapressão de óleo		X						
	Perda de movimentos								
Deteriorização da malha filtrante	Contaminação do fluido							1) Substituição Preventiva	1) 126 dias
	Travamento de elementos móveis do circuito hidráulico					X			
Malha do filtrante fora de especificação	Travamento de elementos móveis do circuito hidráulico							1) Reprojeto	
	Contaminação do fluido		X						
	Perda de movimentos								

#### 5.1.4 - Tubulações

As tubulações são responsáveis por transportar o fluido através do sistema e são classificadas em rígidas ou flexíveis. As rígidas são de aço e as flexíveis de malha de aço revestidas por borracha especial chamadas tecnicamente por mangueiras. Existem, em média, 89 mangueiras por virador, e uma média de 450 metros de tubulação rígida.

O componente foi classificado como consequência em segurança, pois fica pressurizada com pressão na ordem de 200 BAR e um rompimento pode ocasionar projeção de líquido pressurizado em torno do componente. Além do mais a estrutura física permite pessoas próximas a essas tubulações e algo deve ser feito para retirar essa condição.

Com base nos dados possíveis coletados foi calculado a distribuição de Weibull para o modo de falha rompimento de mangote, conforme gráfico da Figura 5.9, as demonstrações do cálculo seguem abaixo:

$$I = n^{\circ} \text{ de elementos}$$

$$X = \text{Média} = \ln \sum x/i$$

$$S^2 = \text{Variância} = \left(\frac{1}{i-1}\right) + (\ln n - x)^2$$

$$S = \text{Desvio padrão} = \sqrt{S^2}$$

$$\beta = \left(\frac{pi}{S}\right) * \sqrt{6}$$

$$\alpha = \exp\left(x + \left(\frac{0,5772}{\beta}\right)\right)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right]$$

$$Tp = \text{Probabilidade de falha de p unidades} = \alpha * (\ln 1 - p)^{\frac{1}{\beta}}$$

Logo:

- I = 12;
- x = 8,723169;
- S<sup>2</sup> = 0,058646;
- S = 0,242169;
- β = 5,296095
- α = 6851,037

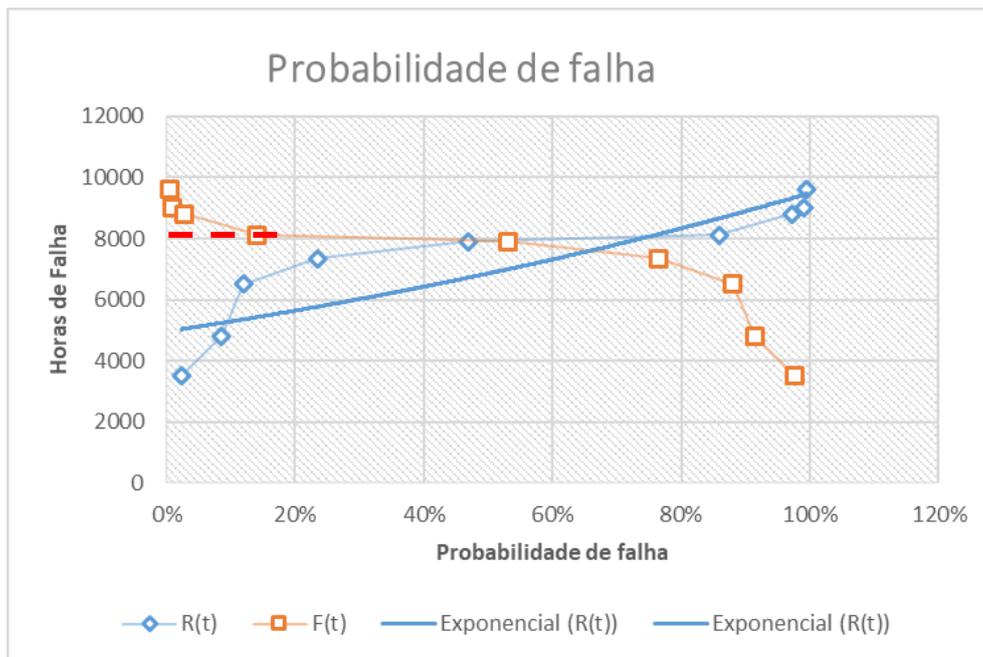


Figura 5.9 - Curva h(t) x R(t).

O gráfico da Figura 5.10 demonstra a distribuição de Weibull baseado numa amostra de 30% dos eventos de falha. Nele verifica-se a curva P-1 iniciando a partir de 8.000 mil horas de trabalho, com a confiabilidade  $F(t)$  decaindo e fator risco  $R(t)$  realizando uma curva inversa com aumento exponencial. A linha tracejada em vermelho mostra o limite tolerável em 7500 horas de trabalho, indicando a probabilidade de falha de 20% dos equipamentos.

Tabela 5.8 - Planilha com proposta da política de manutenção em tubulação.

Equipamento: Descarregadores de Vagões		Analista: Wemerson Almeida		Componete: Tubulação			Data: 27/05/2020		Nº do documento:		
Função: Conduzir o fluido hidráulico				Sistema: Carro Empurrador, grampo da trava e trava de rodeiro				Subsistema: Energia			
Modo de Falha	Efeitos	Classificação da Consequência						Tarefa Proposta	Frequência		
		A	B	C	D/A	D/B	D/C				
Folga dos parafusos dos flanges	Perda de fluido para ambiente		X					1) Restauração Preventiva	1) 84 dias		
	Perda dos movimentos										
Trincas em soldas de ligação e flanges	Perda de fluido para ambiente			X				1) Inspeção Funcional	1) 42 dias		
	Perda dos movimentos										
Rompimento de O'ring	Perda de fluido para ambiente	X						1) Restauração Preventiva 2) Inspeção detectiva	1) 42 dias 2) 15 dias		
	Perda dos movimentos										
Rompimento da malha da mangueira	Perda de fluido para ambiente		X					1) Substituição Preventiva	1) 320 dias		
	Perda dos movimentos										

Os modos de falha “folga dos parafusos dos flanges” e “trinca em soldas de em ligação dos flanges” ficaram com a mesma classificação para ambos os sistemas, tecnicamente as ações são replicáveis. A causa desse modo de falha está ligada as ondas de vibração das linhas de tubulação rígida. É possível perceber através dos 5 sentidos o efeito corda ao longo do comprimento da tubulação, agravando-se imediatamente após o disparo dos acumuladores de pressão.

Segundo a literatura técnica, como afirmado por SPERRY VICKERS (1977), esses fenômenos são comuns e que podem ser agravados pelo designer das tubulações, pois vãos retos prosseguidos com curvas a 90° propiciam esse distúrbio, fora isso somam-se as anomalias de sincronismo de fechamento e abertura de válvulas ou instabilidade de fluxo. Esses distúrbios em graus mais elevados geram fortes ondas de energia aleatórias culminando em golpes de aríete.

Dessa forma ficou selecionado restauração preventiva a cada 84 dias para todos os três sistemas. A ideia é realizar uma inspeção minuciosa nas regiões de flanges com conferência do torque dos parafusos e onde houver sinais de vazamento, deverá abrir o flange e corrigir. Este serviço também pode ser direcionado por uma solicitação de serviço via ordem de manutenção oriundo das inspeções funcionais com frequência de 7 dias.

Os modos de falha rompimento de o'ring e rompimento de malha da mangueira caracterizam por riscos de projeção de líquido pressurizado e as causas podem estar associada a cavitações, especificação de material inadequado, erro na montagem, pressão elevadas no sistema ou perda de secção por abrasão. Em mangotes as malhas entrelaçadas são responsáveis pela capacidade de carga e seu rompimento pode ocasionar luxações externas ou mesmo falhas funcionais instantâneas.

Em pesquisa em campo e entrevista com técnicos é verificada dificuldades em diagnosticar esse tipo de anomalia, primeiro devido a progressão da falha e segundo pelas restrições físicas, onde por vezes não é possível inspecionar 100% do componente.

Já os defeitos no o'ring são passíveis de visualização, geralmente caracterizam-se com uma pequena lâmina de vazamento do fluido e aumentando até romper. Dessa forma sugere-se a troca das mangueiras ou mangotes a cada 320 dias para as posições móveis e 640 dias para os instalados em pontos fixos, sendo estendido aos três sistemas. A tarefa de detecção via inspeção funcional com equipamento operando para detectar potenciais vazamentos a cada 15 dias, onde é possível bloquear seguramente todos os movimentos da máquina deixando somente o UH em estado operação.

## 5.2 - DISCUSSÕES FINAIS

O primeiro ponto a ser observado é a alta padronização dos três sistemas, inclusive com intercambialidade de uma parte significativa dos componentes, e os trabalhos nominais das grandezas como temperatura e pressão. Isso é comprovado pelo diagrama de blocos da Figura 4.2 (Divisão do esquema hidráulico em sistema e subsistema, página 78).

Devido a essa conjuntura adotou-se como estratégia para análise da trava do giro e trava de rodeiro dos vagões a comparação contínua entre subsistemas semelhantes dos três sistemas existentes. As exigências operacionais opõem-se nas ponta do sistema, que

são os cilindros hidráulicos, neste caso os cilindros recebem maior incidência de cargas mecânica aleatória.

Essas confirmações ficaram mais nítidas com a construção da primeira parte da FMEA, onde esclareceu-se os efeitos e causas para os componentes do subsistema classificados como significativos. A Tabela 5.1 (Classificação das consequências dos modos de falha carro empurrador), mostra o quadro de FMEA e nele pode-se observar a existência de 14 modos de falha e 32 causas, exatamente idêntico ao FMEA na Tabela 5.2 (Classificação das consequências dos modos de falha grampo e trava, p. 95).

A partir dessas informações foram definidas medidas mitigatórias através da proposta de tarefas de manutenção (onze no total), que juntas formarão uma estratégia técnica de manutenção para o sistema hidráulico grampo do giro e trava de rodeiros conforme quadro de decisão da Figura 4.24.

As decisões foram levadas e analisadas junto com o engenheiro e técnico do equipamento, foram discutidas medidas de controle e gestão dos dados, pelas dificuldades de gerar uma curva de probabilidade de uma falha para cada sobressalente. Assim, por definição as tarefas adotadas para o sistema carro empurrador se adequam ao sistema grampo do giro e trava de rodeiro.

É necessário entender que existe um combo de tarefas já definidas e catalogadas pela engenharia, logo elas permanecem e neste trabalho foram expostas as tarefas necessárias a incluir ou modificar.

Por último, como objetivo específico deste trabalho, que é identificar falhas inéditas, se faz necessário testes semanais alterando a linha de trabalho ativo para a linha standby, já que ao ser solicitado em uma emergência pode estar em falha, adicionalmente realizar testes de vazamentos internos.

Tabela 5.9 - Comparativo de Resultados 2019 x 2021.

DI			HMC				Quantidade de Falhas			
2019		2021	2019		2021	2023		2025		
Janeiro	86,90	91,30	janeiro	527	375	janeiro	1428	806	janeiro	
Fevereiro	86,00	91,20	fevereiro	448,4	448	fevereiro	1381	842	fevereiro	
Março	79,10	92,40	março	655	369	março	1322	832	março	
Abril	83,40	91,20	abril	609	433	abril	1411	1009	abril	
Maio	85,50	91,00	maio	580	409	maio	1701	759	maio	
Junho	86,70	93,30	junho	709	294	junho	1895	712	junho	
Julho	81,20	90,40	julho	722	386	julho	1835	1164	julho	

O quadro da Tabela 5.9 mostra a evolução nos principais indicadores de manutenção em um período comparativo entre o primeiro semestre de 2019 e o segundo

semestre de 2020. Esse período foi selecionado por manter equilíbrio de contexto operacional. Os números são absolutos e demonstram todas as disciplinas (mecânica, hidráulica, elétrica e automação). Em DI (confiabilidade) o ganho fica em torno de 4%. Em HC (horas corretivas) o valor é mais significativo com média de 36%. Por último em Quantidade de falhas o ganho médio de 44%.

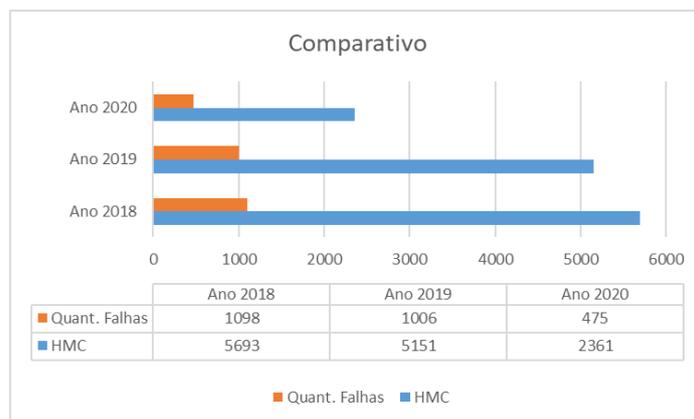


Figura 5.10 - Gráfico de evolução dos indicadores.

Já a Figura 5.10 mostra o resultado da disciplina hidráulica mostrando a evolução dos indicadores positivamente entre 2019 e 2018, tanto em quantidade quanto em quantidade de falhas. Cabe ressaltar a aplicação parcial das ações previstas neste trabalho devido ao limitador tempo. Entretanto houveram zero falhas como cisalhamento da haste de cilindro após a implantação de haste única. Bem como a redução de falhas relacionadas a filtros. Em relação a mangueiras, foram instaladas máquinas que produzem na própria empresa e de forma customizada garantindo o item esteja disponível para ser substituído preventivamente, observando o crescimento de 120% na capacidade de troca e diminuição de 50% em eventos corretivos.

Ainda cabe ressaltar que outras iniciativas paralelas foram feitas em conjunto pelos processos de manutenção e entende-se que esse agrupamento trouxe sólidos resultados para os equipamentos estudados. Adicionalmente entende-se que o objetivo desde trabalho focou em constitui um conjunto de técnicas de manutenção através da metodologia MCC com potencial de mitiga falhas, sendo esse objetivo alcançado.

Outro ponto em observado é uma carteira de serviços envelhecida, e a equipe atual com baixa capacidade para atender a essa demanda. Em relação a este ponto está em estudo a ampliação da capacidade com a contratação de empresa especializada pelo processo.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 6.1 - CONCLUSÕES

Diante de um complexo meio competitivo as empresas devem buscar rever seus processos produtivos continuamente, quer seja na produção de bens ou mesmo de serviços, para sobrevivência do negócio. Essas oportunidades de melhoria podem ser ocultas à primeira vista, entretanto, há uma gama de ferramentas e métodos eficazes, com aplicações em variados campos de estudo, auxiliando a qualificar e quantificar essas oportunidades para uma tomada de decisão assertiva.

A partir do exposto acima, foi feita a revisão bibliográfica trabalhando os principais conceitos que regem a manutenção e a metodologia MCC, verificando a relação da evolução da manutenção com o desenvolvimento histórico da sociedade como mudanças de consumo, de valores, avanço de tecnologias, dentre outros. Esse emaranhado de acontecimentos fez a manutenção sair de um departamento de apoio para uma divisão estratégica passando a gerar valor ao negócio.

Neste sentido, foi utilizado a metodologia MCC para elucidar as oportunidades de ganhos potenciais ao rever as técnicas de manutenção aplicadas no sistema hidráulico dos descarregadores de vagões, sendo proposto a revisão de onze tarefas de manutenção obtendo adequação e customização em relação as consequências das falhas, a fim de obter ganhos ao eliminar falhas e baixar riscos dos sistemas significantes do processo onde está inserida.

Já na Figura 5.4. mostra a evolução dos dados na disciplina de hidráulica onde é percebido a melhora significativa entre 2019 e 2020, tanto em hora corretiva quanto o número de falhas. Cabe ressaltar a implantação parcial das ações estabelecidas, devido a questão tempo deste trabalho bem como a cadeia de implantação da empresa com todos as diretrizes.

A metodologia MCC permanece sendo aplicada, em sua estrutura segmentada, de forma imutável pelos principais autores trabalhados. Entretanto, foram incorporadas derivações sutis de alguns processos decisórios desde sua criação por NOWLAN e HEAP (1978). Tais derivações, como os diagramas de decisões, são frutos da experiência individual de cada autor dentro de seguimentos distintos, sendo essa

combinação de experiências um processo substancial para elaboração de trabalhos mais significativos.

Buscou-se no desenvolvimento e aplicação o confronto entre as análises quantitativa e qualitativa, entretanto as bases de dados de eventos operacionais não alimentam as informações de entradas necessárias para gerar medidas de confiabilidade, ficando quatro subsistemas somente com análise qualitativa.

Outro ponto crítico é a gestão inadequada dos dados referentes aos eventos operacionais que não possuem estrutura e coleta eficiente. Com base nisso, esta dissertação apresenta a necessidade de reavaliar a gestão de dados e informações relativo a eventos operacionais e propõe a estruturação da gestão desses eventos baseados na configuração de entrada de dados na FMEA e nos elementos (dados) necessários para elaborar distribuições de confiabilidade, realizando o processamento correto com todas as informações de cada componente considerando quando foi aplicada, anotações das falhas com a duração, data, e descrição do problema no sistema de manutenção.

Em dissertações do assunto, a predominância de aplicação da MCC recai sobre todo equipamento, no entanto, esta dissertação demonstrou a viabilidade de aplicação parcial limitando-se a um sistema ou subsistema específico e não a um equipamento por completo. Dessa forma, o uso da FMEA pode ser adaptado a análises de sistemas significantes, criando uma alternativa para disseminar o uso da MCC. Entretanto deverá ficar definidas as interações com demais sistemas.

Apesar deste trabalho ter privilegiado as tarefas seguindo a ordem por condição, foi necessário entender a relação entre os números absolutos de horas de manutenções preventivas e horas de manutenções reativas para obter equilíbrio entre as variáveis custo, disponibilidade e riscos, e assim manter o racional atrelado com a estratégia da empresa, e por conseguinte, fazer escolhas eficazes e pertinentes voltadas a obter resultado esperado do negócio.

Sobre falhas inéditas, entende-se que deve haver testes alterando as linhas de trabalho e standby em uma frequência semanal para conseguir visualizar falhas ocultas, tipos de falhas estas bem esclarecidas no decorrer desse projeto.

Espera-se que esse trabalho auxilie outros pesquisadores em trabalhos futuros de equipamentos com as mesmas concepções de projeto, pois constatou-se raríssimos trabalhos do emprego da MCC em descarregadores de vagões com domínio público.

## 6.2 - SUGESTÕES

Após um ano de implementação da gestão de informações dos eventos de falha, que foi limitante para a aplicação de uma abordagem quantitativa em todos os componentes do sistema, fica como sugestões a continuidade desde trabalho com as iniciativas: a aplicação do MCC em 100% do componentes do descarregador de navios; análise da cadeia de suprimento de componentes hidráulicos baseado no sistema Just in Time ; e análise contratos de fornecimento com lead time pré determinado.

A segunda sugestão é a implantação da metodologia Lean Manufacturing na rotina da manutenção dos descarregadores de vagões, abrangendo a inspeção funcional e a execução de manutenção preventivas com objetivo geral em identificar perdas no processo de inspeção e execução de atividades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 55000 – **Gestão de Ativos – Visão Geral, princípios e terminologia**. 1ª Ed. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 5462 - **Confiabilidade e Manutenibilidade – Terminologia e princípios**. 1ª Ed. Rio de Janeiro 1994)

ABRAMAN – **Associação Brasileira de Manutenção de Gestão de Ativos**. Disponível em: < [www.abramam.org.br](http://www.abramam.org.br)>. Acesso em: 05 de junho de 2020, 18h40min.

BLOOM, N. B. **Reliability Centered Maintenance: implementation made simple**. New York: McGraw-Hill, 2006. Tradução livre

CAVALCANTI, R. de A. **Aplicação de RCM em um sistema de rebobinamento para processamento de película plástica flexível**. 107f. Dissertação (Mestrado em engenharia). Universidade Federal de Pernambuco, 2011.

CHIAVENATO, I.; SAPIRO, A. **Planejamento Estratégico**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2020.

COELHO, R. W. S. **Aplicação do conceito de Gestão de Ativos Físicos numa Estação Elevatória de Águas**. 138f. Dissertação (Mestrado em engenharia). Instituto Superior De Engenharia De Lisboa, 2015.

COLOSIMO E. A., SUELY R. G. **Análise de sobrevivência aplicada**. São Paulo: Blucher, 2006.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. São Paulo: Pioneira Thompson Learning, 2006

DICIONÁRIO AURÉLIO (ON LINE). Disponível em: < [www.dicio.com.br](http://www.dicio.com.br)>. Acesso em: 15/06/2020, 16h55min.

FLOGLLIATO, F. S., RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier ABREPO, 2011

IAM, Institute of Asset Management. PAS-55 - **Specifications for Optimized Management of Physical Infrastructure Assets - concepts and application**. 2º Ed. Reino Unido 2008

KARDEC, A; NASCIF, J. **Manutenção: função/estratégia**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2019.

KOMNINAKIS, D. **Análise de confiabilidade para formulação de estratégia de manutenção de equipamentos em uma empresa da indústria alimentícia**. 103f. Dissertação (Mestrado em engenharia). São Paulo, 2017.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. São Paulo: Qualitymark, 2001.

LEEMIS, L. M. **Reliability: Probabilistic Models and Statistic Methods**. Ascended ideas, 2009.

LEWIS, E. E. **Introduction to Reliability Engineering**. 2nd Edition, Wiley, New York, 1996. Tradução Livre.

LEEMIS, L. M. **Reliability, probabilistic models and statistical methods**. Englewwod Cliffs: Prentice-Hall, 2009.

MOBLEY, Keith R.; HIGGINS, Lindley R.; WIKOFF, Darrin J. **Maintenance Engineering Handbook**. 7ª Ed. McGraw-Hill, (2008)

MOUBRAY, J. **Manutenção Centrada na Confiabilidade**. São Paulo: Aladon, 2000.

NASCIMENTO, J. **Plano de manutenção baseada nos preceitos da manutenção centrada em confiabilidade em um processo de produção de refrigerantes – 2014**. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/115276>>. Acesso em: 27 de dezembro de 2020.

NASA. **Reliability-Centered Maintenance Guide**. National Aeronautics and Space Administration (KINDLE). USA, 2018

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Reliability Centered Maintenance Guide for Facilitis and Collateral Equipment – 2000**.

Disponível em <http://www.hq.nasa.gov/office/codej/codejx/> Acesso em 12 janeiro de 2021.

NACSEA. **NAVAL SEA SYSTEMS COMMAND. S9081-AB-GIB-010 - Reliability-Centered Maintenance (RCM) – metodologia, conceitos e aplicação.** 2º Ed. Washington, 2007.

NOWLAN, F. S. *et al.* **Reliability-centered maintenance.** Tradução livre. Springfield: Department of Commerce National Technical Information Service, 2008.

NUNES, E. L. **Manutenção centrada em confiabilidade (MCC): análise da implantação em uma sistemática de manutenção.** 146 f. Dissertação (Mestrado em engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

OHNO, T. **O Sistema Toyota de Produção: Além da produção em larga escala.** São Paulo: Artmed, 1997.

OLIVEIRA, J. T. de O. **Uso de técnicas de Manutenção Centrada na Confiabilidade no Gerenciamento de Riscos em Instalações Elétricas – Uma aplicação na CHESF.** 196f. Universidade Federal de Pernambuco, 2002.

PALADY, P. **Análise dos Modos de Falha e Efeitos, prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram.** Instituto IMAM, São Paulo, 2017.

PEREIRA, L. M. P. **Gestão de Ativos: Estudo de Caso em Empresa de Telecomunicações.** Dissertação (Mestrado em engenharia). Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2016.

RAUSAND, M. (1998) **Reliability Centered Maintenance, Paper of Department of Production and Quality Engineering, Norwegian University of Science and Technology.** n-7034 Trondheim, Norway. Páginas de 20 – 112.

RIBEIRO, H. **O pilar da manutenção programada: como maximizar a disponibilidade dos equipamentos.** São Paulo: PDCA Editora, 2016.

SAE, Society of Automotive Engineers. J1011- **Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes - concepts and application.** 2º Ed. Washington 2009.

SAE- Society of Automotive Engineers. J1739 - **Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design**. Concepts and application. 2º Ed. Washington 2021.

SAKARUDA, E. Y. **As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e \_\_\_ r seus Efeitos e Análise da Arvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos**. 145f. Dissertação (Mestrado em engenharia). Florianópolis, 2001.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração da dissertação**. 4. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2005.

SIQUEIRA, I. P. **Manutenção Centrada na Confiabilidade: manual de implementação**. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2014.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 3ª Ed. São Paulo: Editora Atlas, 2018.

SMITH, A. M.; HINCHCLIFFE, G. R. **RCM—Gateway To World Class Maintenance**. Burlington: Elsevier, 2004

STEVENSON, J. **Planejamento de Manutenção**. São Paulo: Edgard Blucher, 2001.

TAKAHASHI, Y.; OSADA, T. **TPM/MPT: Manutenção Produtiva Total**. São Paulo: Instituto IMAM, 1993.

THURNES C.; ZEIHSELB F.; VISNEPOLSCHIC S.; HALLFELLB F. **World Conference: Using TRIZ to invent failures – concept and application to go beyond traditional FMEA - 2015**.

XAVIER, J. 13 – **Indicadores de Manutenção**. [S.l.: s.n.], 2010. 14 f.

XENOS, H. **Gerenciando a manutenção produtiva**. 1. ed. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços, 2004. 302 p.

ZAIONS, D. R. **Consolidação da metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade em uma planta de celulose e papel**. 219 f. Dissertação (Mestrado em engenharia). Rio Grande do Sul, 2003.