



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO

EVERSON LUIZ DA SILVA MAIA

**MODELO PARA DEFINIÇÃO DE PERIODICIDADE DE INSPEÇÃO PREDITIVA  
DE EQUIPAMENTOS ROTATIVOS COM MÚLTIPLOS MODOS DE FALHA COM  
BASE NO *DELAY TIME***

Recife

2021

EVERSON LUIZ DA SILVA MAIA

**MODELO PARA DEFINIÇÃO DE PERIODICIDADE DE INSPEÇÃO PREDITIVA  
DE EQUIPAMENTOS ROTATIVOS COM MÚLTIPLOS MODOS DE FALHA COM  
BASE NO *DELAY TIME***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa operacional.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo José Pires Ferreira

Recife

2021

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

M217m Maia, Everson Luiz da Silva.

Modelo para definição de periodicidade de inspeção preditiva de equipamentos rotativos com múltiplos modos de falha com base no *delay time* / Everson Luiz da Silva Maia. - 2021.

87 folhas, il., tab., abr. e sigl.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo José Pires Ferreira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2021.

Inclui Referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Gestão de manutenção. 3. Confiabilidade.  
4. Manutenção preditiva. 5. Políticas de inspeção . 6. *Delay time*.  
I. Ferreira, Rodrigo José Pires (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-22

EVERSON LUIZ DA SILVA MAIA

**MODELO PARA DEFINIÇÃO DE PERIODICIDADE DE INSPEÇÃO PREDITIVA  
DE EQUIPAMENTOS ROTATIVOS COM MÚLTIPLOS MODOS DE FALHA COM  
BASE NO *DELAY TIME***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa operacional.

Aprovada em: 25/03/2021.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Rodrigo José Pires Ferreira (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

---

Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virginio Cavalcante (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

---

Prof. Dr. Flavio Trojan (Examinador Externo)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

A mim, por ter me dedicado a este projeto, pois era meu sonho concluir um mestrado em uma universidade pública.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu professor orientador, Dr. Rodrigo José Pires Ferreira, e ao Departamento de Engenharia de Produção, por me apoiar nesta jornada desafiadora.

Ao Estado de Pernambuco, por ser um local acolhedor e cheio de oportunidades de negócios e de empreendimentos.

“Mesmo que a vida pareça difícil, há sempre algo que você pode fazer para ter sucesso nela.”  
(HAWKING, 2013).

## RESUMO

A manutenção preditiva nas indústrias necessita de altos investimentos, mão de obra especializada e periodicidade de inspeções preditivas, e tem um papel fundamental no sucesso de uma política de manutenção para as organizações. Esta dissertação propõe um modelo matemático para definição da periodicidade de monitoramento preditivo de equipamentos rotativos com múltiplos modos de falha baseado na técnica *delay time*. Esse modelo foi aplicado em uma indústria de alimentos de grande porte em um processo de manutenção preditiva fundamentado na análise de vibração com 1.700 equipamentos, com destaque para motores, exaustores, redutores e mancais. Dentre os principais resultados pode se destacar que o modelo indicou a necessidade de revisão da periodicidade de inspeção vigente em diversos equipamentos. Com a aplicação do modelo proposto, foi possível reduzir em mais de 40% uma rota de manutenção preditiva. Esta revisão da periodicidade indica impactos em custo e disponibilidade dos equipamentos e oportunidades de melhorias em contratos de manutenção preditiva.

**Palavras-chave:** gestão da manutenção; confiabilidade; manutenção preditiva; políticas de inspeção; *delay time*.

## ABSTRACT

Predictive maintenance in industries requires high investments, specialized labor and the periodicity of inspections plays a fundamental role in the success of maintenance policies for organizations. In this dissertation, a mathematical model is proposed to define the periodicity of inspection of rotating equipment with multiple failure modes based on the Delay Time technique. The model was proposed in a large food industry in a predictive inspection process based on vibration analysis with more than 1,700 pieces of equipment, including engines, exhaust fans, reducers and bearings. Among the main results, it can be highlighted that the model indicated the need to review the inspection periodicity in force in several equipment's. With the application of the proposed model, it was possible to reduce by more than 40% a predictive inspection route. This periodicity review indicates impacts on equipment cost and availability, opportunities for improvements in predictive maintenance contracts.

**Keywords:** maintenance management; reliability; predictive maintenance; inspection policies; delay time.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de manutenção.....	29
Figura 2 – Tipos de falha de acordo com a frequência de rotação .....	31
Figura 3 – Curva da banheira .....	36
Figura 4 – Tempo entre a inspeção e a falha .....	48
Figura 5 – Conceito de <i>delay time</i> .....	49
Figura 6 – Modelos de intervalo de inspeção e o número de falha .....	50
Figura 7 – Modelo operação, defeito e a falha .....	51
Figura 8 – Sistema complexo de inspeção imperfeita .....	55
Figura 9 – Fluxograma do processo de implantação .....	58
Figura 10 – Gráfico de tendência .....	60
Figura 11 – Espectro em aceleração .....	60
Figura 12 – Espectro em velocidade.....	61
Figura 13 – Equipamentos estudados .....	67
Figura 14 – Espectro que mostra a falha de um rolamento .....	68
Figura 15 – Espectro com a falha no engrenamento .....	69
Figura 16 – Motor da masseira .....	76
Figura 17 – Redutor da masseira (tempo de inspeção).....	76
Figura 18 – Exaustor dos fornos.....	77
Figura 19 – Motores dos fornos.....	77
Figura 20 – Redutores dos fornos.....	78
Figura 21 – Mancais dos fornos .....	78
Figura 22 – Motor da rosca L4000 .....	79
Figura 23 – Redutor da rosca L4000 .....	80
Figura 24 – Conjunto motor e redutor da rosca ninho.....	80

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Evolução da manutenção industrial.....	22
Quadro 2 – Comparação dos sistemas para a implementação da MCC .....	39

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Transformada rápida de Fourier .....	30
Equação 2 – Densidade da falha.....	32
Equação 3 – Função acumulada de falha.....	33
Equação 4 – Função confiabilidade.....	33
Equação 5 – Taxa de reparo instantânea .....	33
Equação 6 – Média da taxa de reparo instantânea em um dado intervalo de tempo .....	33
Equação 7 – Cálculo da disponibilidade .....	35
Equação 8 – Falha de ocorrer no intervalo de tempo .....	49
Equação 9 – Planta complexa.....	52
Equação 10 – <i>Downtime</i> médio para reparo por falha.....	52
Equação 11 – Probabilidade de um defeito falar .....	53
Equação 12 – <i>Downtime</i> esperado.....	54
Equação 13 – Custo por inspeção esperado.....	54
Equação 14 – Probabilidade de um defeito falhar .....	62
Equação 15 – <i>Downtime</i> entre inspeções .....	63
Equação 16 – Custo de inspeção para cada tipo de falha .....	63
Equação 17 – Custo total esperado de manutenção.....	64
Equação 18 – Frequência do engrenamento .....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelo de algoritmo de crítico .....	46
Tabela 2 – Modelo para critérios de gravidade .....	47
Tabela 3 – Comparação dos sistemas para a implementação da MCC .....	61
Tabela 4 – Equipamentos com os modos de falha e tempos .....	73
Tabela 5 – Entrada dos custos .....	74
Tabela 6 – <i>Downtime</i> em horas/ano .....	74
Tabela 7 – Com levantamento de custo e o CT em reais por hora .....	75

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIA	Associação Brasileira da Indústria de Alimentos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DT	<i>Delay time</i>
DTM	<i>Delay time model</i> (modelo <i>delay time</i> )
FMEA	<i>Failure mode and effect analysis</i>
ISO	Sistema de gestão de qualidade
MAUT	<i>Multi-attribute utility theory</i>
MC	Manutenção corretiva
MCC	Manutenção centrada em confiabilidade
MP	Manutenção preventiva
MPD	Manutenção preditiva
MTTF	<i>Mean time to failure</i> (tempo médio até a falha)
MTTR	<i>Mean time to repair</i> (tempo médio de reparo)
NBR	Normas brasileiras
NPR	Número de prioridade de risco
ONU	Organização das Nações Unidas
RCM	<i>Reliability centred maintenance</i>
TPM	<i>Total productive maintenance</i>
TX	Taxa de falha

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	17
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	18
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>18</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>18</b>
1.3	METODOLOGIA DA PESQUISA .....	18
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	19
<b>2</b>	<b>BASE CONCEITUAL E REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>21</b>
2.1	ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO.....	21
2.2	TIPOS DE MANUTENÇÃO.....	23
<b>2.2.1</b>	<b>Manutenção corretiva</b> .....	<b>24</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Manutenção preventiva</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Manutenção preditiva</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Análise de vibração na manutenção preditiva</b> .....	<b>29</b>
2.3	CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E DISPONIBILIDADE .....	31
<b>2.3.1</b>	<b>Confiabilidade</b> .....	<b>31</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Mantenabilidade</b> .....	<b>33</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Disponibilidade</b> .....	<b>34</b>
2.4	MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE.....	37
2.5	CUSTO DE MANUTENÇÃO.....	42
2.6	PERIODICIDADE DE INSPEÇÃO .....	44
<b>2.6.1</b>	<b>Definição dos critérios de criticidade</b> .....	<b>45</b>
2.7	<i>DELAY TIME</i> .....	47
<b>2.7.1</b>	<b>Delay time para único componente</b> .....	<b>47</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Delay time para planta complexa</b> .....	<b>52</b>
<b>2.7.3</b>	<b>DTM com inspeção perfeita</b> .....	<b>53</b>
<b>2.7.4</b>	<b>DTM com inspeção imperfeita</b> .....	<b>54</b>
2.8	CONHECIMENTO <i>A PRIORI</i> .....	55
<b>3</b>	<b>PROPOSTA DE MODELO DE PERIODICIDADE DE INSPEÇÃO COM MÚLTIPLOS MODOS DE FALHA</b> .....	<b>57</b>
3.1	LEVANTAMENTO DOS EQUIPAMENTOS MONITORÁVEIS .....	57
3.2	ESTRATIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA.....	57

3.3	ENTREVISTA COM OS ESPECIALISTAS .....	58
3.4	CÁLCULO DO CUSTO TOTAL.....	62
3.5	ANÁLISE DO CUSTO TOTAL E SUAS IMPLICAÇÕES .....	64
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>65</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA .....	66
4.2	EQUIPAMENTOS E LINHAS DE PRODUÇÃO .....	66
4.3	CARACTERIZAÇÃO E PRINCIPAIS DEFEITOS E MODOS DE FALHA EM FMEA.....	67
4.4	CARACTERIZAÇÃO DAS POLÍTICAS DE INSPEÇÃO VIGENTES (PERIODICIDADE E SISTEMÁTICA) .....	70
4.5	APLICAÇÃO DO MODELO .....	71
4.6	ANÁLISE DE RESULTADOS DE DISCUSSÕES .....	75
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
5.1	LIMITAÇÕES .....	81
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	82
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das indústrias é caracterizado por diversos avanços tecnológicos dos equipamentos que demandam cada vez mais ações de manutenções mais complexas. A manutenção preditiva tem contribuído no desempenho das indústrias no processo produtivo por meio de técnicas que visam a aumentar a vida útil dos equipamentos, à disponibilidade e à redução de custos decorrentes de falhas (GARCIA *et al.*, 2006; JARDINE *et al.*, 2006).

As principais técnicas de manutenção preditiva se baseiam em ensaios não destrutivos para inspecionar os equipamentos de maneira sistemática, como, por exemplo, a análise de vibração que utiliza instrumentos modernos para analisar o padrão de vibração.

Diversos modelos de análise são capazes de indicar a fase inicial do processo de degradação em rolamentos, folgas, cavitações e engrenagens, assim como de identificar diversos modos de falha, principalmente em equipamentos rotativos, tais como: motores, redutores, mancais, bombas e compressores. Isso possibilita ao gestor traçar estratégias que contemplem um maior aproveitamento do tempo de vida do equipamento e o melhor momento para intervenção no equipamento (TACQUES *et al.*, 2009).

O processo de monitoramento baseado na condição do equipamento pode ser considerado complexo e requer muitos procedimentos. Equipamentos apresentam variações de carga, rotações baixas e forças dinâmicas que aumentam a complexidade do monitoramento preditivo. A quantidade excessiva de ajustes no processo produtivo demanda variações de carga que podem comprometer o funcionamento de equipamentos, o que torna a manutenção preditiva fundamental (ADOGHE, 2013).

Uma elevada quantidade de equipamentos a serem monitorados pela manutenção preditiva e uma capacidade limitada de recursos são fatores cruciais no desenvolvimento de políticas de manutenção para elaboração de bons laudos preditivos. Além disso, os processos de monitoramento preditivo dos equipamentos têm rotas que normalmente são determinadas apenas de acordo com a criticidade dos equipamentos (MAIA, 2019).

As empresas que desejam desenvolver uma política de manutenção preditiva precisam dimensionar o custo com investimento na aquisição dos equipamentos, contratar mão de obra especializada e selecionar os equipamentos críticos para o processo de monitoramento. Muitos profissionais acreditam que quanto mais equipamentos forem inspecionados com mais frequência, mais será beneficiada a qualidade dos laudos de manutenção preditiva. Entretanto, essa dinâmica pode elevar os custos de inspeção e o desgaste dos analistas em analisar centenas de equipamentos por dia. Muitas vezes, diversos equipamentos monitorados

apresentam baixa taxa de falha e poderiam ter uma periodicidade de inspeção aumentada (MAIA, 2019).

Fundamentada na premissa da perspectiva da otimização da periodicidade da inspeção, esta dissertação busca analisar o monitoramento baseado na condição de equipamentos com múltiplos modos de falha. O desafio deste estudo consiste em desenvolver um modelo para dimensionar o melhor período de inspeção dos equipamentos, permitindo maior qualidade nas análises, e para contribuir potencialmente na redução de custos de contratos de manutenção, na inclusão de novos equipamentos nas rotas de análise de vibração dentro da manutenção preditiva, na redução da mão de obra e no aumento da competitividade.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Importante é destacar que a manutenção preditiva é um dos pilares da manutenção industrial, a qual faz uso de técnicas de ensaios não destrutíveis na inspeção dos equipamentos sem afetar a produtividade nem a segurança.

O processo de implantação da manutenção preditiva requer um investimento alto e mão de obra especializada. Uma das técnicas mais populares é a análise de vibração, que utiliza coleta de dados em equipamentos rotativos com sensores, utilização de *software* de processamento de dados, históricos vibracionais para prever falhas e para identificar qual componente está com processo de degradação.

As empresas, quando adotam a política de manutenção que contempla a manutenção preditiva, fazem muitos estudos para dimensionar suas equipes e para saber os equipamentos que serão investidos para respectivas técnicas e quais serão incluídos nas rotas de manutenção preditiva.

Nesse contexto, um fator crucial para a construção da periodicidade de inspeção dos equipamentos é a quantidade de equipamentos que a equipe poderá suportar para realizar um trabalho com qualidade e assertividade.

Muitos gestores, empresas e políticas de manutenção não levam em consideração o custo do equipamento parado, a taxa de falha do equipamento e o tempo parado por quebra para cada modo de falha do equipamento. Múltiplos modos de falha demandam um desafio adicional na definição de uma periodicidade de inspeção. Por exemplo, um motor pode ter múltiplos modos de falha, tais como: lubrificação, rolamentos, folga, elétrica, desalinhamento entre eixos, entre outros (MAIA, 2019).

Caso a periodicidade da inspeção seja adequada, o processo de monitoramento dos equipamentos pode se beneficiar de uma melhor qualidade na inspeção e, conseqüentemente, nos laudos de análises de vibração.

Com um modelo matemático de apoio à definição do período ideal de inspeção para cada equipamento com base em múltiplos modos de falha, seria possível melhorar o desempenho do processo de monitoramento como um todo, promovendo maior assertividade dos diagnósticos, qualidade nos laudos e redução do custo de inspeção por equipamento.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Objetivo deste trabalho é apresentar um modelo de apoio da decisão para inspeção de equipamentos através da política de manutenção e com múltiplos modos de falha.

### 1.2.1 Objetivo geral

A presente dissertação tem como objetivo geral desenvolver um modelo de apoio à definição de periodicidade de inspeção de equipamentos rotativos com múltiplos modos de falha para uma política de manutenção preditiva.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, pretende-se:

- levantar o estado da arte sobre modelos de periodicidade de inspeção preditiva;
- desenvolver um modelo de periodicidade de inspeção preditiva para múltiplos modos de falha;
- validar o modelo com base em dados e características de uma indústria; e
- analisar a aplicação do modelo proposto.

## 1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA

O estudo de caso foi realizado em uma indústria de massas e biscoitos no estado de Pernambuco e serviu de experimento para desenvolvimento de um modelo para periodicidade de inspeção com múltiplos modos de falha baseado na técnica de *delay time* (MAIA, 2019).

Um conjunto de 1.700 equipamentos foi selecionado para desenvolvimento do modelo. Esse conjunto contempla uma típica rota de inspeção preditiva envolvendo equipamentos como motores, redutores, mancais, exaustores e bombas.

Dentre as principais fontes de dados para esta pesquisa, foram considerados dados do sistema de gerenciamento da manutenção industrial, o conhecimento de especialistas dos equipamentos, a base histórica de laudos preditivos de nove anos de monitoramento desta indústria e as estruturas de contratos de manutenção preditiva terceirizada.

#### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este estudo foi realizado e estruturado basicamente em cinco capítulos: “Introdução”, “Base conceitual e referencial teórico”, “Proposta de modelo de periodicidade de inspeção com múltiplos modos de falha”, “Estudo de caso” e “Conclusões”.

O primeiro capítulo é referente a uma contextualização da síntese do assunto abordado, mostrando, de maneira estruturada, a justificativa, os objetivos, a situação prática motivadora e a estrutura da dissertação como norteadora do estudo.

O segundo capítulo por sua vez traz citações sobre manutenção, Engenharia de Manutenção e evolução desse processo durante o século passado, e expõe os tipos de manutenção (preventiva, corretiva e preditiva). A manutenção preventiva trabalha basicamente em uma conservação programada e em inspeções. A manutenção corretiva não é uma manutenção programada e tem alto custo por sua adoção. A manutenção preditiva faz uso de técnicas que trabalham na condição do equipamento, como análise de vibração e análise termográfica. Nesse capítulo, apresentam-se também os estudos baseados na confiabilidade dos equipamentos por meio de procedimentos industriais e de técnicas como *failure mode and effect analysis* (FMEA), bem como são abordadas a disponibilidade, a manutenibilidade, as falhas e a técnica de *delay time*, modelo que determina o melhor momento para inspecionar os equipamentos.

No terceiro capítulo, é exibido um procedimento para aplicação do modelo do *delay time* com múltiplos modos de falha. Esse procedimento tem aplicabilidade ampla para diversas indústrias que fazem uso de manutenção preditiva. No capítulo em questão, são mostrados, por meio de fluxograma, o passo a passo da implantação do modelo proposto e as fórmulas utilizadas.

No quarto capítulo, são expostos o estudo de caso, as características da empresa, o ramo de atuação, os equipamentos que serviram como base para o estudo, a estrutura do

projeto de construção do modelo e o processo produtivo. Também é realizada a caracterização dos modos de falha de cada equipamento, mostrando a política de inspeção utilizada pela manutenção preditiva dentro da empresa estudada, assim como a periodicidade dos equipamentos monitorados, sendo estruturada a metodologia do modelo proposto. Expõe-se também a aplicação do modelo proposto, consolidando e analisando que a periodicidade pode ser modelada dentro de parâmetros estruturados e técnicos, e também mostrando o resultado de toda a consolidação do levantamento dos dados para a construção do modelo.

No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões da dissertação. Nesse capítulo, conclui-se que este estudo pode ser aplicado em outras áreas da manutenção e que o custo para inspecionar um equipamento é muito baixo em relação a uma parada por falha catastrófica, podendo sofrer ajustes dentro de contratos de manutenção. Com a aplicação desse modelo, foi possível reduzir em mais de 40% uma rota de inspeção preditiva. Adicionalmente, são mostradas as limitações do trabalho e as sugestões para pesquisas futuras.

## 2 BASE CONCEITUAL E REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo vamos apresentar toda a base referencial e conceitual para embasar este trabalho na aplicação do modelo de apoio a decisão

### 2.1 ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO

A manutenção, de acordo com Borges (2009), é definida como um conjunto de ações técnicas e administrativas que objetiva manter um objeto em um estado de eficiência no qual seja capaz de desempenhar a função requerida no processo, cuja finalidade está em assegurar que um equipamento continue a exercer as funções para as quais foi projetado. Com fundamento na Norma Brasileira (NBR) 5462 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT], 1994), a manutenção é um conjunto integrado de ações desenvolvidas no decorrer do ciclo de vida do equipamento, com a finalidade de manter ou repor sua operacionalidade.

Para Jesus (2013), a manutenção está relacionada ao setor administrativo de uma indústria, visando a um maior desempenho, produtividade e eficiência na cadeia de produção. Baglee e Janturen (2014) explicam que a importância da manutenção se dá pelo fato de ser uma área que engloba vários segmentos por intermédio de diversos tipos de abordagens, procedimentos e metodologias.

O século XXI foi marcado pela globalização, e houve um elevado crescimento do setor de manutenção dentro do universo industrial e de manufaturas, como resposta ao aumento da concorrência no meio corporativo com o surgimento de novos produtos (BAGLEE; JANTUREN, 2014).

Após o início da Revolução Industrial, no final do século XVIII, a função da manutenção surgiu dentro do contexto industrial em crescimento como meio de manter a continuidade da produção, sendo executada pelos próprios funcionários durante a operação (WYREBSK, 2007). Filho (2011) afirma que tal formato foi aplicado até o final da Primeira Guerra Mundial, quando o aumento da demanda por produtos industrializados exigiu da indústria um modelo diferente, e que a introdução do método de linha de montagem, por Henry Ford, desencadeou uma necessidade de sistemas de manutenção mais eficazes.

O desenvolvimento de métodos voltados para o setor da manutenção, segundo Kardec e Nasif (2009), acompanhou o desenvolvimento industrial nos últimos cem anos. Porém, os

últimos trinta anos se destacam, pois foram marcados por mudanças e evoluções significativas.

A evolução do conceito de manutenção, conforme Moubray (1997), foi classificada por meio de quatro grandes subdivisões representadas no Quadro 1, a seguir.

Quadro 1 – Evolução da manutenção industrial

<b>Evolução da manutenção</b>	<b>Expectativas quanto ao desempenho da função</b>	<b>Políticas e filosofias predominantes</b>	<b>Técnicas e procedimentos</b>
1ª Geração (1940-1950)	Reparo após avaria e estabilidade da capacidade de produção.	Corretiva	Substituição de itens, reparos de emergência e isolamento da falha.
2ª Geração (1950-1980)	Maior disponibilidade e produtividade dos ativos físicos; maior vida útil dos equipamentos e componentes e menores custos.	Preventiva	Troca sistematizada de componentes, revisões gerais programadas e sistemas de planejamento e controle.
3ª Geração (1980-2000)	Maior disponibilidade e confiabilidade dos ativos físicos; maior vida útil dos equipamentos e componentes; maior segurança operacional; e maior produtividade, competitividade e lucratividade.	Preditiva TPM MCC (RCM)	Monitoramento de condições e parâmetros operacionais, inclusão da confiabilidade e manutenibilidade nos projetos e análise de riscos, modos de falhas, causas e efeitos.
4ª Geração (2000-atual)	Alinhamento com os objetivos estratégicos corporativos; inserção nos sistemas integrados de gestão; engenharia de manutenção e melhoria da manutenibilidade.	Proativa <i>Asset management</i> (gestão de ativos físicos)	Redes neurais, sistemas especialistas, interfaces “wireless” e “bluetooth”, multidisciplinaridade e multiespecialização.

Fonte: adaptada de Moubray (2000).

De acordo com Siqueira (2012), a primeira etapa correspondente ao período do final do século XIX até o ano de 1945, quando o fim da Segunda Guerra Mundial gerou avanços tecnológicos significativos. Na referida etapa, a indústria apresentava níveis de mecanização baixos, pois, na época, o maquinário tinha grandes dimensões, além de poucas técnicas e ferramentas para manutenção, limpeza e lubrificação, cabendo à gerência da fábrica as medidas preventivas possíveis de serem executadas quando necessário.

Moubray (1997) afirma que, com o aumento da demanda de materiais e de suprimentos em geral, ocorrido como consequência do fim da Segunda Guerra, gerou-se uma necessidade maior na produtividade das indústrias, inaugurando-se, assim, uma segunda etapa de mecanização industrial.

Alavancada por esse impulso de demanda de produção, a década de 1950 foi marcada pelo início das discussões acerca de uma manutenção mais ostensiva para evitar falhas no sistema operacional das indústrias, sendo, por conseguinte, aplicadas as ideias dessas discussões. Nesse momento, o impacto financeiro gerado por essa iniciativa foi tão

significativo que as indústrias começaram a desenvolver sistemas de planejamento de manutenção específicos para cada operação (SOUZA, 2009).

A terceira fase foi marcada pelo surgimento de novas tecnologias relacionadas ao processo de manutenção, com maior investimento em pesquisas sobre o referido tema. O objetivo seria aumentar a confiabilidade dos equipamentos e sua disponibilidade, garantindo maior segurança aos operadores e ao meio ambiente, visando, assim, a alcançar padrões estabelecidos de qualidade relacionados a uma maior eficiência econômica (MOUBRAY, 1997).

No que diz respeito à quarta etapa da evolução da manutenção, Barros Filho (2003) afirma que a mesma teve início a partir do ano 2000 e tem como característica considerar e resolver problemas situacionais através de tecnologia avançada, com o processamento contínuo de dados através de sistemas interconectados, cujo objetivo está em maximizar os investimentos através da criação de produtos inteligentes.

Segundo Nascif *et al.* (2010), a tecnologia, a automação e o conceito de confiabilidade desenvolvidos durante a terceira geração industrial proporcionaram à quarta geração direcionar pesquisas e desenvolvimentos voltados à estratégia das corporações, à disponibilidade do equipamento e à sua confiabilidade. Sob o ponto de vista de Dunn (2003), a quarta geração vem sendo marcada, entre outros eventos, pela substituição gradual da palavra “manutenção” pelo termo “gestão de ativos”, pois este engloba os conceitos de análise de risco entre outras estatísticas.

Assim sendo, Souza (2009) afirma que os procedimentos relacionados à manutenção podem ser usados como base de cálculo do retorno de investimento na implantação do sistema de manutenção preditiva, levando em consideração os gastos operacionais da implantação do sistema, como equipamentos, estruturas, contratação e treinamento de pessoal, e o impacto financeiro nos primeiros meses de implantação, formando, conseqüentemente, o montante a ser investido.

## 2.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO

Apresentação deste capítulo será referente os tipos de manutenção e suas técnicas aplicadas.

### 2.2.1 Manutenção corretiva

A NBR 5462 (ABNT, 1994) conceitua manutenção corretiva como aquela “[...] efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a colocar um item em condições de executar uma função requerida”, não havendo planejamento prévio das ações por parte da empresa.

Tenório (2009) leciona que, historicamente, o primeiro tipo de manutenção a ser incorporado pela indústria foi a manutenção corretiva aperfeiçoada e incorporada ao contexto industrial por meio do método de linha de produção desenvolvido por Henry Ford em meados da década de 1930, tornando-se obsoleto pela falta de flexibilidade do seu modo de produção.

Nos casos em que o equipamento com falha se encontra parado, comprometendo o operacional de toda a produção, a manutenção corretiva é a primeira ação a ser tomada, visando a uma retomada da normalidade da produção. Portanto, de acordo com Moraes (2004), essa manutenção é realizada “[...] para restabelecer um sistema técnico, um bem ou um serviço cujo desempenho tenha sofrido uma queda depois de ter saído de um estágio específico”.

Silva (2004) afirma que a referida medida é considerada a mais cara entre os métodos de gerenciamento de manutenção, pois é uma técnica reativa que aguarda a ocorrência da falha da máquina ou equipamento para que se tome qualquer ação de manutenção, resultando em um tempo elevado de paralisação da máquina, custo de estoque de peças etc.

A manutenção corretiva é a atuação da correção da falha do equipamento do modo de reestabelecer sua condição normal de operação, na maioria dos casos, ela ocorre de maneira não planejada onerando os custos de manutenção e da produção (KARDEC *et al.*, 2001).

Conforme Viana (2014), a manutenção corretiva é dividida em duas classes:

- 1) manutenção corretiva não planejada: consiste no conserto da falha do equipamento ou sistema de forma randômica, por se tratar de um defeito apresentado inesperadamente e sem nenhum planejamento anterior, ou seja, para é o reparo da falha ou desempenho tido como menor do que o esperado após a falha. Esse tipo de operação gera altos custos à empresa, causando perda na produção, no tempo de vida útil do equipamento e uma extensão maior de danos à máquina.
- 2) manutenção corretiva planejada: trata-se da correção de um defeito ou falha que está a prejudicar o desempenho de um equipamento, estando inserida dentro dos parâmetros de observação da manutenção preditiva, e sendo diferenciada da não planejada apenas por se tratar de uma decisão da gestão empresarial. Para Kardec *et*

*al.* (2012), essa manutenção possibilita à empresa algumas vantagens, tais como: agendamento da manutenção de comum acordo com a linha de produção; aumento da segurança por erradicar uma falha que poderia comprometer a segurança do ambiente de trabalho; flexibilidade na estratégia dos serviços de reparo; garantia de estoque de peças sobressalentes, equipamentos e ferramentas destinadas para manutenção; e facilidade na organização de equipes de trabalho de manutenção. Como o próprio nome sugere, o planejamento para a execução de uma manutenção minimiza custos e contribui com a segurança, sendo executada com maior rapidez e eficácia. O lado negativo dessa técnica é um custo maior de sobressalentes, pois aumenta seus estoques com peças e equipamentos parados.

### **2.2.2 Manutenção preventiva**

Ao contrário do método corretivo, essa manutenção tem como objetivo evitar a ocorrência de falhas em equipamentos. Pereira (2010) explica que a manutenção preventiva, assim como a preditiva, diz respeito a uma atuação realizada focada em reduzir ou evitar a falha ou a queda no desempenho do equipamento, mediante a elaboração de um plano de manutenção previamente proposto.

Com a crescente demanda de produtos industrializados no pós Segunda Guerra Mundial, o modelo de manutenção corretiva não atendia mais à demanda por não ter planejamento, o que o torna não confiável, e por apresentar altos riscos para o andamento da operação (LUCATELLI, 2002).

Cha *et al.* (2017) afirma que a indústria alemã, pressionada por uma alta demanda de produção, passou a desenvolver um sistema de prevenção de falhas considerando que os equipamentos tem um tempo médio de vida útil. Para Kardec *et al.* (2010), o tempo médio entre falhas pode ser um guia na análise da manutenção preventiva. Para isto, pode-se utilizar dados históricos para determinar a periodicidade dessa manutenção.

O diferencial do referido método em relação à manutenção preditiva é o fato de a mesma ser baseada na condição do equipamento definido mediante análise do histórico dos equipamentos, procurando-se determinar o tempo provável no qual ocorrerá a falha por meio de estimativas. Entretanto, não se pode determinar exatamente quando essa falha irá ocorrer (PEREIRA, 2010).

Para Lafraia (2014), a manutenção preventiva objetiva manter o sistema em um *status* disponível e operante por intermédio da prevenção de defeitos nos equipamentos, utilizando-

se de inspeções periódicas, controles e serviços como limpeza, calibração, lubrificação, identificação de falhas etc. Por haver planejamento de ações por parte do setor de manutenção, o mesmo direciona as atividades visando a reduzir o percentual de falhas do equipamento, bem como a diminuir o risco de baixo desempenho de algum item. Tais atividades podem ser vistas com respaldo:

- no tempo: prevenção e retardo de uma possível falha por meio de inspeções, substituições e restaurações;
- na condição: identificação dos sinais da ocorrência de defeitos antes que a falha ocorra.
- em testes para descobrir a falha: identificação das falhas antes de uma parada na produção.

A manutenção preventiva, portanto, é caracterizada por um trabalho sistemático na prevenção e na ocorrência de falhas, mantendo-se, assim, um controle contínuo sobre o equipamento. Essa manutenção é considerada como a mola mestre no que diz respeito às atividades relacionadas à manutenção que envolvam tarefas sistemáticas, tais como: inspeções, substituição de peças e reformas.

Para a execução da manutenção preventiva, no tocante à substituição e à remoção de itens defeituosos e/ou desgastados em datas previamente estabelecidas, Lucatelli (2002) afirma que, para executar em uma fábrica a manutenção preventiva, o gestor deve inventariar todos os equipamentos da fábrica, bem como conhecer sua localização e informações básicas.

Com tantas operações, esse tipo de manutenção é uma ação que demanda altos gastos, porém, de acordo com Xenos (2004), o valor do investimento nela é, geralmente, inferior às perdas, caso uma falha ocorra na linha de produção.

Se for executada rotineiramente, com as revisões e manutenções sendo feitas regularmente, ocorrerá redução significativa no custo operacional e na quantidade de falhas e problemas com o equipamento em questão. Kardec e Nascif (2010) elencam alguns fatores que devem ser considerados em casos de adoção da técnica de manutenção preventiva por parte da gestão industrial. São eles:

- quando não há possibilidade de executar manutenção preditiva;
- em situações referentes à segurança dos funcionários ou do ambiente de trabalho em que há a necessidade latente da intervenção para substituição de componentes;
- para execução de manutenção de equipamentos em estado crítico e amplamente utilizados pelo setor;
- quando houver riscos de impacto ao meio ambiente;

- quando o sistema industrial é complexo, e a operação é contínua.

Esse tipo de manutenção é caracterizado pela remoção do equipamento da linha de produção para o serviço previamente programado, tendo a máquina necessidade de reparos ou não. Em termos de falhas do referido modelo, o mesmo não tem soluções para defeitos não previstos do equipamento, e a troca, muitas vezes prematura, de peças não o torna atrativo financeiramente (KARDEC; NASCIF, 2001).

### 2.2.3 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva, segundo Casali (2018), é caracterizada como uma ação a fim de garantir a qualidade e a disponibilidade dos equipamentos e maquinário por meio da implementação de uma série de técnicas de análise, partindo dos dados recolhidos de supervisão ou de amostragem, com a finalidade de reduzir a manutenção baseada no tempo e nas manutenções corretivas.

Trata-se de um conjunto de atividades de acompanhamento das variáveis ou parâmetros que indicam a *performance* ou desempenho dos equipamentos, de modo sistemático, visando a definir a necessidade ou não de intervenção, no qual se utiliza qualquer recurso de predição, por exemplo: vibração, ultrassom e termografia (JESUS, 2013).

Para Prado (2010), a manutenção preditiva é um monitoramento sistemático que visa a acompanhar as condições operacionais dos equipamentos. O referido processo pode pressupor o tempo de vida útil das máquinas e seus componentes, trabalhando, por conseguinte, para que esse tempo seja aproveitado ao máximo.

Ao adotar tal procedimento de manutenção preditiva, a mesma proporcionará, segundo Prado (2010), maior detalhamento de itens específicos, bem como o controle da qualidade do produto final, reduzindo os insumos significativamente por meio do processo, por exemplo a emissão de insumos descartados e restos de produção. A adoção da referida modalidade pode acrescentar na empresa:

- aumento de confiabilidade;
- melhoria na qualidade;
- redução dos custos de manutenção;
- aumento da vida útil de componentes, equipamentos e instalações; e
- melhoria na segurança de processos, equipamentos, instalações e pessoas.

Sendo assim, a manutenção preditiva, por intermédio dos fatores elencados, possibilita o cálculo de retorno do investimento.

Na afirmativa de que o principal objetivo desse tipo da manutenção preditiva é antecipar a falha dos equipamentos e, nesse processo, verificar o desempenho dos mesmos, se estão operando em plenas condições, com suporte em diversos parâmetros de análise, e tentando, assim, elevar ao máximo o tempo operacional estimado para a referida máquina sem que haja intervenção de manutenção corretiva.

A manutenção preditiva usa como base a leitura de diversas variáveis como parametrização, a qual tem limites e normatização das técnicas. As leituras ou parametrização dos modelos se aproximam desses limites, normalmente superior ou inferior, e se baseiam em um deles, de modo a controlar a falha iminente (GARG; DESHMUKH, 2006). Os sistemas de monitoramento de dados em tempo real ou em monitoramento *off-line* também são necessários para um acompanhamento sistemático dos equipamentos (BEVILACQUA; BRAGLIA, 2006).

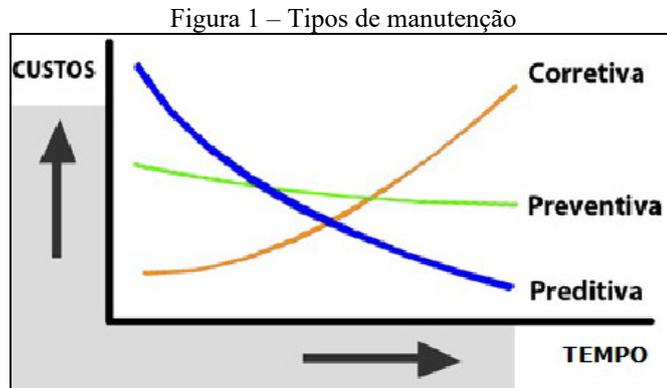
A detecção antecipada de uma anomalia, por sua vez, pode ajudar na programação da manutenção dos equipamentos, com isso reduzindo o custo de manutenção, de equipamentos parados e do valor cobrado por homem hora para a atividade que foi designado. Do mesmo modo, a contínua monitoração de certas variáveis permite que se trace e acompanhe um perfil ao longo do tempo da condição de uso ou de deterioração do equipamento (GARCIA *et al.*, 2006).

De acordo com Christer (2008), as técnicas de manutenção preditiva mais usadas na estratégia dessa ação nas indústrias são a análise de vibração, a termografia e a ferrografia.

Por meio da técnica de análise de vibração, pode-se detectar uma anomalia vibracional nos equipamentos, sendo que a principal variável observada é a frequência de ressonância, medida em Hertz (Hz). Cada componente produz uma vibração com frequência específica que, em condições normais de funcionamento ou em funcionamento, mediante o estresse dos equipamentos, alcança amplitude máxima determinada (YA'CUBSOHN, 1983). Caso a amplitude se modifique, é possível que haja algum problema em andamento (NEPOMUCENO, 1985). A análise das vibrações permite detectar falhas potenciais e revelar suas origens, com antecedência suficiente para programar uma manutenção planejada e com baixo custo (TACQUES *et al.*, 2009). Essa prática é conhecida como “manutenção sob condição”.

Para Casali (2011), a manutenção preditiva vai além de executar análises e de agir preventivamente, pois seu objetivo está em orientar os operadores, contribuindo para o

trabalho em equipe, aumentando sua eficácia e reduzindo os custos da empresa, como visto na Figura 1.



Fonte: Abramam (2013).

#### 2.2.4 Análise de vibração na manutenção preditiva

A análise de vibrações, de acordo com Nepomuceno (1985), é uma das técnicas mais importantes para avaliar a condição operacional do equipamento e tem a capacidade de prever, por meio de espectros e de níveis de vibração, anomalias vibracionais.

Para Filho (2010), depois dessas análises, pode-se programar uma manutenção do equipamento com o menor custo. A vibração corresponde a uma oscilação em torno de um ponto de referência e existe quando um sistema reage a forças internas e externas. Cada problema mecânico (por exemplo: desalinhamento e desbalanceamento) gera frequências periódicas na mesma faixa de frequência, sendo, assim, possível analisar a vibração do equipamento e identificar seu problema em questão, desenvolvendo apropriados passos de reparação. Na análise de vibrações, é importante compreender dois dos componentes do sinal de vibração: a amplitude e a frequência.

A amplitude é o “tamanho” do sinal de vibração e depende da magnitude da força de excitação, da massa e da rigidez do sistema e do seu amortecimento. A grandeza em deslocamento, velocidade ou aceleração é indicadora de gravidade através da amplitude do sinal. O deslocamento, normalmente medido em micrômetros, é a mudança da posição de um componente em relação a uma referência. Geralmente, esse evento acontece em baixa velocidade do equipamento ou em problemas estruturais. A velocidade constitui-se “n” rapidez com que o deslocamento ocorre e é normalmente medida em mm/s; já a aceleração é a variação da mudança da velocidade ou a mudança da velocidade em um período de tempo e é

medida em g, que é a aceleração produzida pela força da gravidade, sendo que o valor de g é  $9,8 \text{ m/s}^2$  (ABREU, 2010).

A frequência é o número de vezes que um evento ocorre em um certo período de tempo e, através dela, é possível identificar potenciais falhas em equipamentos, pois muitas dessas falhas ocorrem sempre na mesma frequência, sendo simples encontrar a causa do problema e programar a manutenção do equipamento em tempo hábil, antes de uma quebra catastrófica. A frequência é expressa em Hz, que representa ciclos por segundo (BRADY, 2002).

A transformação rápida de Fourier (*fast Fourier transformation*, FFT) é um método utilizado para decompor o sinal de vibração no qual o equipamento tem diversas frequências aleatórias ao equipamento. A função do FFT na análise de vibração é apresentada em forma de um espectro denominado “espectro de frequências”, e, através dele, é possível determinar a localização de um problema e identificar suas causas (ANDRAWUS *et al.*, 2008).

A Equação 1 expressa a função do FTT:

$$X(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi \frac{mn}{N}} \quad (1)$$

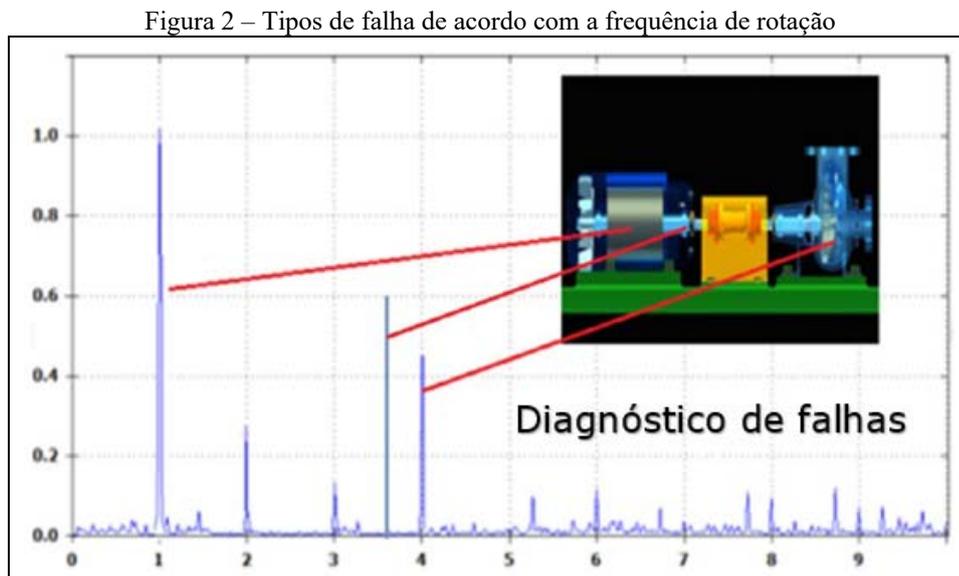
Freitas (2016) afirma que a manutenção preditiva utiliza a análise de vibração em máquinas e equipamentos nas corporações para uma posterior análise de falhas desde meados da década de 1970. Tal recurso foi amplamente aplicado no setor petroquímico e em refinarias de petróleo, os quais, ao adotarem tais medidas de manutenção preditiva, obtiveram uma economia considerável e maior disponibilidade e tempo de vida útil do equipamento.

De acordo com Jesus (2013), a manutenção preditiva diz respeito a um conjunto de análises por meio de medições de vibração executadas por equipamentos de medição adequados, durante o período de operação das máquinas. O objetivo de tal análise é prever possíveis falhas e detectar alterações físicas nos componentes que indiquem a necessidade do agendamento da manutenção, evitando, assim, maiores danos e perdas.

As máquinas, ao entrarem em estado de operação, emitem algum tipo de vibração que, segundo Abreu *et al.* (2010), acarreta, aos poucos, um certo nível de desgaste dado em decorrência do esforço dinâmico. Tal desgaste tem como indicativo de ocorrência a alteração na distribuição da energia vibratória por meio do conjunto de peças constituintes do

equipamento. Assim, ao observar a evolução da análise de vibração, é possível obter informações acerca do estado da máquina.

Para Jesus (2013), as principais falhas que podem ser sanadas com manutenção preditiva de análise de vibração são: rolamentos deteriorados, engrenagens com defeito, acoplamentos desalinhados, rotores desbalanceados, vínculos desajustados, eixos deformados, lubrificação deficiente, folga excessiva nas buchas, falta de rigidez, problemas hidráulicos, cavitação, desbalanceamento de massas rotativas, eixo empenado, desalinhamento em geral, rolamentos danificados ou inadequados, cavitação/refluxo hidráulico, turbulência em mancais de deslizamento, motores elétricos defeituosos e engrenagens desgastadas ou incorretas. Conforme mostra a Figura 2, a seguir, cada linha de frequência apresenta um respectivo defeito.



Fonte: O autor (2021).

## 2.3 CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E DISPONIBILIDADE

Neste capítulo os conceitos e aplicabilidade das técnicas de manutenção baseada na confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade.

### 2.3.1 Confiabilidade

O termo “confiabilidade” tem sua origem na palavra em inglês *reliability*, que, de acordo com Tatsch (2010), foi desenvolvida durante a década de 1950 nos Estados Unidos. Em 1960, a *Federal Aviation Administration* (FAA) criou um grupo de pesquisa com a

finalidade de desenvolver novas técnicas de manutenção propostas por intermédio do Programa de Confiabilidade no contexto da indústria aeronáutica, pois havia a necessidade de atender a uma demanda na análise de falhas em equipamentos eletrônicos de uso militar.

Para Ascher (1984), a confiabilidade é definida como a capacidade de um item, sistema, instalação, dispositivo, produto ou serviço, em executar adequadamente suas funções previamente especificadas sob condições pré-determinadas.

Fogliato (2009), por sua vez, afirma que o conceito surgiu após o fim da Primeira Guerra Mundial, ao ser mencionado em estudos comparativos entre aviões, sendo consolidado como técnica de manutenção durante a década de 1970 no setor de Engenharia de Produção. Após o término Segunda Guerra Mundial, em razão da falha nos protótipos dos mísseis que estavam sendo desenvolvidos na Alemanha, foi contratado o matemático Robert Lusser para analisar o sistema operacional. Ao final da análise, foi proposta a Lei da Probabilidade de um produto com componentes em série, na qual se estabeleceu que a confiabilidade de um sistema em série é igual ao produto das confiabilidades e seus componentes.

Trata-se, portanto, da probabilidade que um componente ou sistema tem para que não haja falha, por um período de tempo previamente determinado, em ambiente controlado por orientações específicas (LAFRAIA, 2001).

Segundo Cunha (2012), as funções equacionais mais aplicadas na análise de confiabilidade são: função densidade de falhas  $f(t)$ , Equação 2; função acumulada de falhas  $F(t)$ , Equação 3; e função confiabilidade  $R(t)$ , Equação 4. A função densidade de falhas  $f(t)$  refere-se à variação da probabilidade da falha por unidade de tempo, sendo matematicamente representada pela Equação 2. A função acumulada de falhas  $F(t)$  é encarregada de calcular a estimativa de falha de um componente em um intervalo de tempo representado por  $t_1$  e  $t_2$ . A função confiabilidade caracterizada pela expressão  $R(t)$  representa o oposto da Equação 3, logo, trata-se da taxa probabilística que um item tem de não ocorrer a falha entre os intervalos de tempo representados por  $t_1$  e  $t_2$ . As citadas equações e suas respectivas fórmulas seguem abaixo:

- função densidade da falha:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2)$$

- função acumulada de falha:

$$F(t_2) - F(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad (3)$$

- função confiabilidade:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (4)$$

### 2.3.2 Manutenibilidade

A manutenibilidade trata-se da

[...] probabilidade de uma dada ação de manutenção efetiva, para um item sob dadas condições de uso, poder ser efetuada dentro de um intervalo de tempo determinado, quando a manutenção é feita sob condições estabelecidas usando procedimentos e recursos prescritos. (ABNT, 1994).

A razão da probabilidade condicional é que a constante T do término de uma ação de manutenção corretiva ocorra em um dado intervalo de tempo  $(t, t_m + \Delta t)$ , pela duração t desse intervalo, quando  $\Delta t$  tende a zero, supondo que a ação esteja em andamento no início do intervalo de tempo dado pela Equação 5:

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t} \frac{\text{pr} [ t < T < (t + \Delta t) \quad T > t ]}{\Delta t} \quad (5)$$

$\mu(t)$  é a média da taxa de reparo instantânea em um dado intervalo de tempo  $(t_1, t_2)$ .

A taxa de reparo média se relaciona com a taxa de reparo instantânea, pela Equação 6:

$$\mu(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \mu(t) \cdot dt \quad (6)$$

Fogliatto *et al.* (2011, p. 50) definem a manutenibilidade como

[...] a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, mediante condições preestabelecidas de uso, quando submetido à manutenção sob condições predeterminadas e usando recursos e procedimentos padrão.

Já a norma NBR ISO 14224 (ABNT, 2011) classifica a manutenibilidade como a possibilidade da restauração de um item de volta a uma condição específica, por meio de um período determinado, na qual tal manutenção é executada por profissionais qualificados para a referida tarefa, usando procedimentos e equipamentos previamente estabelecidos.

A manutenibilidade é um fator essencial no estabelecimento da disponibilidade de uma unidade, pois, de acordo com Lafraia (2001), sua função encontra-se diretamente relacionada ao esforço aplicado nas ações de manutenção.

Essa ação está normalmente direcionada a algum projeto de um equipamento. E na fase do controle inicial, na qual a criação é determinada pelos planos de manutenção e pelos tempos necessários para a manutenção do equipamento, ela relaciona as definições de confiabilidade e de manutenibilidade.

A NBR 5462 (ABNT, 1994) define manutenibilidade como sendo a facilidade de um equipamento ou dispositivo de ser mantido ou recolocado na condição normal de operação e sua função de acordo com suas especificações.

Para Lafraia (2001), a manutenibilidade tem um conceito que estuda a probabilidade e a estatística dos equipamentos para serem recolocados em condições de operação dentro de um período quando as ações de manutenção são executadas de acordo com procedimentos preestabelecidos.

### **2.3.3 Disponibilidade**

A disponibilidade, segundo Zhao (2018), é a probabilidade na qual o item esteja pronto para uso no instante em que foi solicitado. A taxa de disponibilidade se eleva quando o intervalo entre as falhas se torna espaçado, estando diretamente relacionado ao tempo médio entre falhas e o tempo médio até o conserto do equipamento.

Para Verri (2007), o objetivo de maior importância da manutenção é dar continuidade à operacionalidade da empresa por meio de uma grande disponibilidade dos equipamentos, tendo em vista que os números relativos às perdas decorrentes de falhas em equipamentos são exorbitantes em razão do baixo controle na gestão da manutenção, como rotina de manutenção preventiva, inspeções e rotina da manutenção.

A NBR 5462 (ABNT, 1994) estabelece que o indicativo de disponibilidade “[...] consiste na capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo”.

Mengue e Sellitto (2005) explicam que a disponibilidade é a probabilidade de que um equipamento esteja disponível para exercer suas funções básicas de operação no momento em que for exigido. Já Dias (2010) mostra que a disponibilidade de um sistema está diretamente ligada à vida útil desse sistema ou ao tempo de operação pela Equação 7.

$$\% \text{ disponibilidade} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \times 100 \quad (7)$$

Na Equação 7, o MTBF representa o tempo médio entre falhas (*mean time between failures*) e ajuda a identificar se a variável tempo entre cada falha do equipamento está reduzindo ou aumentando, o que contribui na gestão do planejamento das manutenções preventivas. Já o MTTR é o tempo médio de reparo (*mean time to repair*), responsável por criar indicadores de tempo de manutenções emergenciais de cada equipamento que vir a falhar.

O termo “falha”, de acordo com Castilla (2018), está eventualmente associado a um fato ocorrido em um sistema ou equipamento em que houve comprometimento operacional em decorrência da incapacidade de algum componente de desempenhar sua função. Moubray (1997) define a falha como uma interrupção ou alteração na produtividade de um equipamento, classificando a falha por meio aspectos como: origem, extensão, velocidade, manifestação, criticidade e idade.

Na NBR 14224 (ABNT, 2011), a falha é definida como o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida; é a diminuição total ou parcial da capacidade de uma peça, componente ou máquina de desempenhar sua função durante um período de tempo, quando o item deverá ser reparado ou substituído. A falha leva o item a um estado de indisponibilidade.

Para Siqueira (2012), a prevenção e a correção de falhas estão entre os objetivos primordiais da manutenção. Na manutenção centrada em confiabilidade (MCC), de acordo com Zaions (2003), as falhas são classificadas por meio do impacto que provocam na produção, podendo ser uma falha funcional (caracterizada pela inoperância de um item em desempenhar uma função específica dentro dos limites determinados) ou potencial (estado de um equipamento nos quais os dados possam ser identificáveis e mensuráveis, indicando uma falha funcional iminente ou em processo).

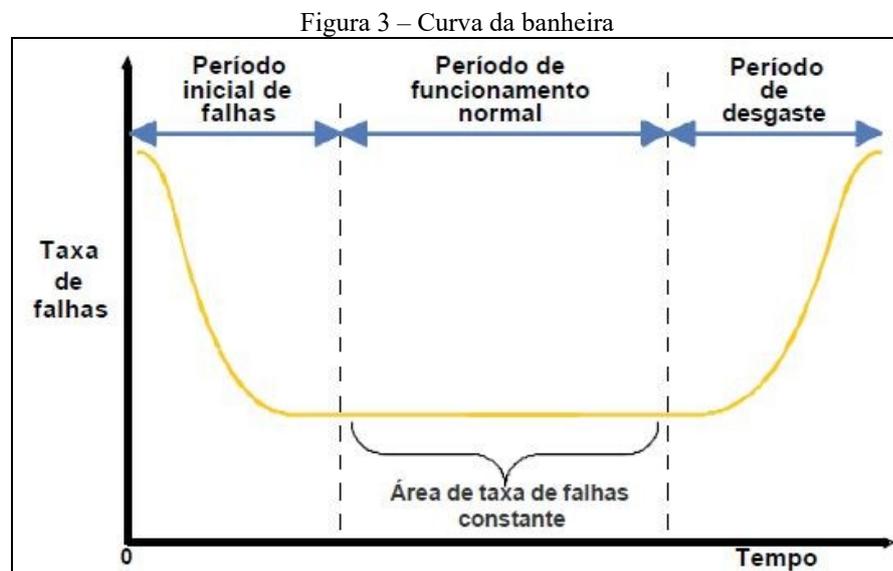
Com relação às falhas funcionais, Zaions (2003) elencam os seguintes subgrupos:

- falha evidente: detectadas durante a rotina normal da equipe de manutenção;

- falha oculta: não detectada durante a rotina; e
- falha múltipla: ocorre quando uma falha oculta em combinação com uma segunda falha se torna evidente.

Moubray (2000) afirma que, no caso das falhas potenciais, elas se apresentam mediante uma condição identificável e/ou mensurável dentro de uma falha funcional ou em seu processo de ocorrência, tendo seu início no momento em que o equipamento apresenta uma alteração no desempenho de suas funções, podendo, assim, evoluir para uma falha funcional.

Um item de suma importância no que diz respeito à análise de confiabilidade é o gráfico da variação da taxa de falha em função do tempo, mais conhecido como “curva da banheira”. A Figura 3, a seguir, representa a característica de vida de um equipamento conhecida como “curva da banheira”, como os equipamentos se comportam conforme seu tempo de vida útil, no qual, no começo da sua vida útil, a probabilidade de falha também é elevada, depois se estabiliza, mas, no final, período em que o desgaste tende a aumentar, as falhas aumentam.



Fonte: adaptada de Pinto (2011).

Para Macchi *et al.* (2012), o período inicial de falhas refere-se à denominada “mortalidade infantil”, ou seja, são falhas prematuras, como, por exemplo, erros no processo de fabricação do equipamento, na instalação ou no uso de materiais.

Empresas, então, optam pela manutenção corretiva como estratégia para evidenciar os erros e eliminar as falhas no projeto, pois, havendo a continuidade dessa manutenção, aumenta a possibilidade de esse equipamento alcançar seu pleno desempenho.

Na maturidade do componente, período esse após a “mortalidade infantil”, o componente apresenta uma taxa de falha constante, ocasionada por danos casuais como fenômenos controláveis, tais como: mau uso do componente, imprevisibilidade dos fenômenos da natureza e ultrapassagem dos limites do equipamento.

De acordo com Brioschi (2011), o tipo de manutenção mais recomendado para a referida fase é a preditiva, pois ela é realizada conforme a necessidade do item, baseando-se no histórico de inspeções periódicas. Na última fase, denominada como “fim da vida útil dos equipamentos”, é indicada como o período de desgaste do componente, sendo considerado como a fase final de sua vida útil.

## 2.4 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

A manutenção centrada em confiabilidade (MCC) provém do inglês *reliability centered maintenance* (RCM), e Siqueira (2012) afirma que esse termo teve sua origem no setor da aeronáutica, com a necessidade de uma certificação da linha de aviões Boeing 747 pela *Federal Aviation Authority* (FAA) nos Estados Unidos em 1968, quando foi criada uma iniciativa pela empresa United Airlines, ficando ela conhecida por meio da sigla MSG-1 (*maintenance steering group*). O referido grupo, por intermédio de um relatório, foi responsável pela introdução dos conceitos de MCC utilizados e desenvolvidos atualmente.

O principal objetivo do MCC estava em redirecionar estrategicamente o trabalho na manutenção para uma maior preservação dos equipamentos, componentes, sistemas e processos para segmentos em que a confiabilidade se apresenta como peça fundamental na eficácia no desempenho do componente, e, conseqüentemente, assegurar maior retorno financeiro (SIQUEIRA, 2012).

Fogliatto e Ribeiro (2011) definem a MCC como um sistema que engloba vários métodos do universo da Engenharia com a finalidade de que os equipamentos de uma indústria continuem a realizar suas respectivas funções.

Por fazer uso de uma abordagem sistêmica e objetiva, a MCC é vista como o programa que possui as ferramentas de gestão de manutenção mais eficientes. Esse sistema se baseia na definição das funções e padronização do desempenho dos equipamentos, atentando-se para as características das possíveis falhas, assim como para o estudo das causas, efeitos e descrição de ações com o objetivo de prevenir ou reduzir a ocorrência dos eventos de falha, visando a reduzir as rotinas de manutenção e, conseqüentemente, os custos.

Para Kardec e Nascif (2012), a MCC tem como característica o estudo detalhado dos equipamentos ou sistemas por meio de análises de possíveis falhas, proporcionando à equipe de manutenção o poder de escolher o melhor método para neutralizar a falha ou de reduzir as perdas decorrentes da falha. Partindo desses pressupostos, Marques (2017) afirma que a MCC tem uma metodologia estruturada, direcionada para a realização de um serviço de manutenção com maior eficiência, ocasionando maior confiabilidade naqueles que a aplicam.

Entre os benefícios proporcionados pela MCC, Siqueira (2005) cita:

- elevação da taxa de lucro da produção em consequência da redução de paradas fora da programação da empresa e o aumento da disponibilidade dos equipamentos;
- redução de custos referentes a manutenções indevidas ou ineficazes e aumento do tempo útil dos itens;
- ser responsável por fornecer soluções às empresas no que diz respeito ao aumento de produção e, conseqüentemente, pela elevação de lucros, por meio de ações rápidas, caso haja alguma alteração nas especificações dos equipamentos, na segurança no trabalho, na segurança ambiental ou nas regras sanitárias;
- mostrar um elevado conhecimento sobre os equipamentos e sistemas que compõem a fábrica, proporcionando maior precisão nas informações sobre as máquinas, resultando no aumento da confiabilidade e de investimentos;
- criação de banco de dados referente a históricos dos equipamentos, objetivando oferecer suporte à manutenção através de sistemas de interface operacional;
- melhoria na eficiência e confiabilidade dos equipamentos; e
- utilizar ações planejadas conforme tipo, efeito, causas e conseqüências de possíveis falhas através de contramedidas eficazes.

Inicialmente, Moubrey (2000) afirma que, para a aplicação da MCC, o gestor deve responder a sete questionamentos junto a uma equipe cuja tarefa é revisar as respostas sob o viés de análise crítica, inserindo o contexto empresarial em questão. São eles:

1. Quais são as funções e padrões de desempenho de um equipamento no seu contexto presente de operação?
2. De que maneira ele falha em cumprir suas funções?
3. O que causa cada falha funcional?
4. O que acontece quando ocorre cada falha?
5. De que maneira cada falha importa?
6. O que pode ser feito para predizer ou prevenir cada falha?
7. O que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa proativa apropriada?

Posteriormente, Siqueira (2005) fez uma reformulação das perguntas feitas por Moubray (2000), incluindo uma oitava pergunta:

1. Quais são as funções a se preservar?
2. Quais são as falhas funcionais?
3. Quais são os modos de falha?
4. Quais são os efeitos das falhas?
5. Quais são as consequências das falhas?
6. Quais são as tarefas aplicáveis e efetivas?
7. Quais são as alternativas restantes?
8. Quais são as frequências ideais das tarefas?

Para que haja implementação da MCC bem sucedida, deve-se, portanto, seguir algumas etapas. Os estudos de Moubray (2000), NASA (2000), Lafraia (2001), Siqueira (2005) e Fogliato e Ribeiro (2009) propõem diversas etapas, conforme o Quadro 2.

Quadro 2 – Comparação dos sistemas para a implementação da MCC

<b>Etapas</b>	<b>Moubray (2000)</b>	<b>NASA (2000)</b>	<b>Lafraia (2001)</b>	<b>Siqueira (2005)</b>	<b>Fogliato e Ribeiro (2009)</b>
1	Definição das funções e padrões de desempenho	Identificação do sistema e suas fronteiras	Requisitos operacionais	Seleção do sistema e coleta de informações	Escolha do comitê e equipes de trabalho
2	Definição da forma como o item falha ao cumprir suas funções	Identificação do sistema e suas fronteiras	Análise funcional	Análise de modos de falha e efeitos	Capacitação em MCC
3	Descrição da causa de cada falha funcional	Examinar as funções	Elaborar FMEA	Seleção de funções significantes	Estabelecimento dos critérios de confiabilidade
4	Descrição das consequências de cada falha	Definir falhas e modos de falha	Diagrama de decisões	Seleção de atividades aplicáveis	Estabelecimento da base de dados
5	Definição da importância de cada falha	Identificar as consequências da falha	Programa de manutenção	Avaliação da efetividade das atividades	Aplicação da FMEA e classificação dos componentes
6	Seleção de tarefas preditivas e preventivas para cada falha	Análise do diagrama lógico de discussão		Seleção das atividades aplicáveis e eletivas	Seleção das atividades de MP pertinentes
7	Seleção de tarefas alternativas	Seleção de tarefas preventivas		Definição da periodicidade das atividades	Documentação das atividades de MP
8					Estabelecimento de metas e indicadores
9					Revisão do programa de MCC

Fonte: Rosa (2016).

A FMEA, conhecida como “análise de modos de falha e efeitos”, trata-se de uma técnica de análise de registros de possíveis falhas em potencial dentro de um sistema, cujo objetivo encontra-se em eliminar a possível falha e, conseqüentemente, sua ocorrência (ROMEIRO, 2010).

Para Siqueira (2012), a FMEA é vista como uma resposta ao avanço tecnológico ocorrido durante e no pós Segunda Guerra Mundial, pois a mesma foi responsável por alterar e mudar tanto fatores comportamentais quanto questões relacionadas ao consumo, que resultam no aumento da demanda e impactam diretamente na produção e no modo de manutenção operante dentro do contexto industrial.

O referido método foi incorporado como parte de um programa de qualidade tal como ISO 9000, QS 9000 (versão ISO para a indústria automobilística), *Advanced Product Quality Planning* (APQP), ou aplicado isoladamente em 1988. Smith (2014) afirma que a FMEA foi desenvolvida em 1949 nos Estados Unidos para fins militares e, posteriormente, integrada oficialmente, de acordo com Hasbullah e Ahmad (2015), em programas aeroespaciais em meados da década de 1960, cuja prioridade estava em aumentar a segurança e a confiabilidade. Posteriormente, a FMEA foi introduzida na indústria automobilística a partir da década de 1980. Essa ferramenta é considerada de baixo risco e possui como objetivos o prognóstico de problemas, a execução de projetos, os processos ou serviços recentes ou revisados e o relatório do projeto ou processo.

Sobral (2013) explica que a FMEA é um sistema metodológico de prevenção de falhas com características indutivas, proporcionando a análise de cada item sistematicamente, levando em consideração os possíveis modos de falha que possam ocorrer com o equipamento, assim como suas causas e efeitos no contexto industrial, no qual o componente encontra-se inserido. Para Pinto (2011), “Um modo de falha é definido como sendo toda e qualquer falha que seja inerente a um equipamento ou componente, e que resulte em uma perda funcional sobre um sistema ou subsistema”.

Kardec e Nascif (2012) conceituam a abordagem da FMEA por se caracterizar pela hierarquização dos potenciais falhos, atuando com medidas preventivas para saná-las, sendo vista por Thurnes *et al.* (2015) como principal ferramenta com maior uso no que diz respeito à análise e prevenção de falhas.

Para a aplicação e estudo da FMEA, o gestor deve reunir inicialmente uma equipe de trabalho, e, posteriormente, deve ser feito o esquema do fluxograma do processo de produção (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). É necessário, ainda, que a referida planta apresente a

sequência de etapas que compõem o processo, objetivando facilitar a visualização das interfaces técnicas.

Bertsche (2008) define os termos em ordem estrutural, nos quais a FMEA deve ser organizada:

- descrição do produto ou processo: o produto e seus componentes devem ser descritos seguindo os padrões estabelecidos pelos objetivos da FMEA na empresa;
- funções do produto: devem ser evidenciadas quais as funções do produto ou processo no qual a FMEA está sendo implantada. A perda das funções é caracterizada como falha;
- potenciais modos de falha: apontar os modos de falha mais evidentes, representados pelo modo como a falha se apresenta e como é observada;
- efeitos de falhas potenciais: o resultado dos modos de falha nos equipamentos em que ocorrem a falha, bem como o produto final;
- índice de severidade (S): aplicar, em uma escala de 0 a 10, o nível de gravidade da falha e identificar o efeito negativo causado ao produto;
- causa potencial das falhas: corresponde às causas principais das falhas, devendo serem realizados um levantamento e um estudo mais aprofundado nesse ponto;
- índice de ocorrência (O): trata de quantificar, em uma escala de 0 a 10, a frequência da ocorrência da causa do modo de falha gerado por meio do histórico de falha do equipamento;
- controles atuais de prevenção: modo de formulação do projeto de maneira que evite a ocorrência da falha;
- controles atuais de detecção: indicar as ferramentas usadas na detecção dos modos de falha antes que o produto, processo ou projeto chegue ao consumidor final;
- índice de detecção (D): pôr em uma escala de 0 a 10 a possibilidade do controle atual em detectar a causa de algum modo de falha, assumindo a mesma. Quanto mais alto o índice de detecção, pior será a qualidade do controle de detecção da atual gestão;
- índice NPR (número de prioridade de risco): é obtido ao multiplicar o índice referente ao S, O e D. Tem como finalidade as falhas que demandam ações imediatas, com prioridade na ação de contenção ou redução do episódio de ocorrência ou severidade, assim como no aumento do índice de detecção da falha;
- ações recomendadas: ações realizadas baseadas nos resultados obtidos através do cálculo do índice NPR. As ações recomendadas objetivam atuar na redução ou

anulação da ocorrência da falha, ocasionando a redução do índice de severidade e uma melhoria na detecção da falha;

- mecanismo da falha: diz respeito ao detalhamento da ocorrência da falha;
- responsabilidades e prazos: termo definido pela responsabilidade e prazos na tomada de decisões recomendadas pela equipe responsável pela FMEA;
- revisão de índices S, O e D: novos índices realizados após as recomendações serem aplicadas.

Para Ramos (2006), a FMEA é atualmente utilizada na redução e prevenção de possíveis falhas em produtos e processos e para, dessa maneira, poder reduzir a taxa de probabilidade de falha nas organizações, sendo amplamente utilizada para análise de riscos em setores da Engenharia.

A citada ferramenta, portanto, foi criada para auxiliar o engenheiro a visualizar com maior eficácia os possíveis problemas que podem ocorrer em operações.

Posteriormente, os riscos identificados são avaliados, e as respectivas medidas e ações necessárias para que haja a redução de tais riscos são tomadas, aumentando, assim, a confiabilidade do produto ou processo.

Em sistemas complexos, a inspeção e o monitoramento têm um papel importante na manutenção. Isso ocorre porque, na maioria desses sistemas, as falhas catastróficas não ocorrem imediatamente e são caracterizadas por um processo no qual a falha é precedida por um defeito. Wang (2008) faz um destaque importante para modelagem de *delay time* em sistemas complexos, devendo ser feita uma aproximação para que as chegadas de defeitos de todos componentes sejam agrupadas em único grupo.

Também é necessário assumir que o *delay time* de todos os defeitos segue uma distribuição idêntica. Para alguns processos, isso pode não ser verdade, visto que os modos de falha podem ter distribuições diferentes se os impactos dependerem de diferentes critérios. Como destacado por Jones *et al.* (2009), é importante aplicar técnicas para identificar falhas críticas, pois, nos modos de falha, as chances para um equipamento entrar em falhas são altas, com isso, pode-se afetar a tomada de decisões de inspeção.

## 2.5 CUSTO DE MANUTENÇÃO

Os custos de manutenção podem ser divididos em:

- custos diretos: relacionados a peças de reposição, insumos, mão de obra, serviços de manutenção com terceiros;

- custos indiretos: ligados à depreciação dos equipamentos por motivo de reparo de equipamento em razão de alguma falha catastrófica ou falta de manutenção;
- custos induzidos: impactados por falha de manutenção, como a gestão de hora extra dentro na manutenção excesso de mão de obra terceirizada e contratos sem licitações.

Dentro da gestão de custos de manutenção, são direcionados os planos de contenções de gastos ou planos de investimento. A manutenção como um todo está diretamente ligada ao custo do produto final, à qualidade do produto e à eficiência da planta.

Os gastos com manutenção podem ser determinantes para a saúde financeira da empresa, bem como para seu sucesso.

Segundo Niquele (2012), o custo da manutenção de uma operação, processo ou produto no contexto industrial é indicado mediante a relação entre o custo total de manutenção (material, mão de obra etc.) e o faturamento bruto da empresa em um período determinado de tempo.

O cálculo do custo da manutenção por faturamento surge como indicador para a verificação do quantitativo de recursos aplicados face ao faturamento bruto da empresa. Por não haver a necessidade de interpretações técnicas por meio da equipe de manutenção, o cálculo dos custos é realizado pela contabilidade ou pela controladoria da corporação.

Para Souza (2009), a coerência nos apontamentos dos custos de manutenção nos equipamentos é de fundamental importância para o gerenciamento da manutenção, pois, além de alimentar uma base de dados referentes ao histórico do maquinário, oferece ao gestor ferramentas para que o mesmo obtenha o custo final do produto acabado.

Xenos (2004) afirma que os custos da manutenção correspondem a uma generosa fatia dos custos de produção de uma empresa, pois, para que o equipamento continue operando, há a necessidade de se ter peças para reposição e conserto, materiais de uso, mão de obra, planejamento e execução.

Pinto (2009) classifica os custos de manutenção em três sessões:

- custos diretos: despesas necessárias para manter o equipamento funcionando, estando inclusos custos de mão de obra, materiais e peças sobressalentes, materiais de consumo, execução de serviços internos e externos através da contratação de mão de obra terceirizada;
- custos de perda de produção: causados em decorrência de falhas de equipamentos importantes sem que haja equipamento sobressalente para fazer a substituição, e/ou quando a falha do equipamento é causada por ação imprópria da manutenção;

- custos indiretos: referentes à estrutura de gestão e administração, custos com análises para melhoria na produção, supervisão, manutenção, entre outros, assim como aquisição de novos equipamentos, instrumentos, ferramentas, custos com depreciação, energia elétrica, amortização etc.

A manutenção é de suma importância para o bom andamento da produção dentro de um contexto de complexo industrial, e seu objetivo está em manter a qualidade e a funcionalidade dos equipamentos e dos elementos na linha de produção. Para Kardec e Nascif (2013), o crescente interesse sobre a manutenção na estratégia empresarial está relacionado ao aumento dos níveis de *performance* que a mesma proporciona para máquinas e equipamentos, reduzindo o número de paradas na produção por falha.

## 2.6 PERIODICIDADE DE INSPEÇÃO

A inspeção em equipamentos de transporte requer periodicidade e reparo por questões de confiabilidade e de riscos. Dessa maneira, a manutenibilidade e a manutenção devem ser levadas em consideração pelos engenheiros (GONCHARENKO, 2018).

A segurança da operação depende muito da pontualidade, da reparação e da manutenção devidamente executadas em qualquer sistema que requerer uma inspeção baseada no tempo ou na condição do equipamento das partes.

Em qualquer caso, a periodicidade ideal para manutenção e para realizar reparos é muito importante e deve ser predeterminada a fim de evitar possíveis danos e problemas relacionados com as prováveis falhas.

Embora a previsão dos estados técnicos de engenharia esteja bastante desenvolvida na teoria da confiabilidade, ainda existe uma deficiência em algumas novas abordagens científicas para explicações de probabilística e de fenômenos.

Com relação a qualquer tipo de sistema ou processos, existe a possibilidade de perceber os problemas das disposições de segurança que sejam semelhantes (BERRADE *et al.*, 2012). Por exemplo, em redutores de velocidade querer uma inspeção periódica no seu nível de óleo e na qualidade do lubrificante para determinar se estas inspeções podem ser realizadas com ajuda de *software* para criar rotina de inspeção sistemática baseada no tempo ou na condição do equipamento por meio de análise de óleo em laboratório, indicando o melhor momento para a substituição ou utilização de filtragem para óleo lubrificante.

Algumas tentativas nesse sentido foram feitas em alguns casos particulares (GONCHARENKO, 2018). Ainda assim, são necessários desenvolvimentos teóricos adicionais, com possíveis generalizações.

A definição de uma política de inspeção é um grande desafio para gerentes de manutenção em sistemas complexos. Christer (1987) propôs o conceito de *delay time*, que representa o intervalo de tempo desde a origem de um defeito no sistema até sua falha. Se ocorrer uma inspeção durante esse intervalo, o defeito pode ser detectado, e a falha pode ser evitada.

Para Marques (2017), um equipamento crítico é aquele que apresenta o maior indicador de complexidade em sua manutenção ou representa alto grau de risco para o equipamento ou para a integridade física do pessoal de manutenção que não possui equipamento (*stand by*). Já Kardec *et al.* (2002) afirmam que os equipamentos críticos e tecnicamente importantes para o processo produtivo são os que impactam na segurança ou no meio ambiente.

Segundo Lopes *et al.* (2018), o primeiro passo para identificar um sistema será levar em consideração a criticidade que os equipamentos têm para o processo. Métodos como a criação de um algoritmo para determinar a criticidade dos equipamentos podem ser usados para esse propósito.

Uma vez que o sistema tenha sido definido, este deve ser descrito para caracterizar as funções realizadas, pois a descrição do sistema contém as funções primárias e secundárias dos sistemas e subsistemas. Depois de identificar as funções, modos de falha são identificados. Moubray (2001) define modo de falha como qualquer evento que possa causar falha funcional. Portanto, primeiro deve-se fazer uma lista de falhas funcionais e depois identificar a falha e os modos de falha que resultam em falha funcional.

### **2.6.1 Definição dos critérios de criticidade**

Fabro (2003) utilizou a técnica de estatística mostrada na Tabela 1 para cada equipamento com peso em sua nota. Essa técnica constitui-se em comparar os critérios de criticidade entre si, em pares, para identificar o quanto o equipamento é mais importante que o equipamento predecessor, e sua pontuação é dada por meio de pesos:

- 5 – critério muito mais importante que o outro;
- 3 – critério médio mais importante que o outro;
- 1 – critério de pouca importância a mais que o outro.

Tabela 1 – Modelo de algoritmo de crítico

	B	C	SOMA	5
A	A5	C1	5	53
	B	B	3	33
		C	1	11
		TOTAL	9	100

Fonte: Fabro (2003).

Há uma relação dos critérios A, B e C com a utilização dos pesos 1, 3 e 5. O resultado é que o critério A é muito mais importante que o B; B tem pouca importância a mais que C; e C tem pouca importância a mais que A.

Ao somar os pontos recebidos por cada critério e dividir pelo total, determina-se a hierarquia (grau de importância) relativa entre os mesmos. Assim, o critério A tem 53% de grau de importância, para 33% de B e 11% de C. Em suma, supõe-se que a empresa já determinou o planejamento estratégico, então, a importância de conhecimento das metas e do planejamento estratégico da empresa é fundamental para determinar as ações na manutenção.

Os objetivos estratégicos para uma empresa, propostos por Fabro (2003), são:

- qualidade percebida do produto;
- acidentes de trabalho;
- flexibilidade de *mix* de produto;
- equipamentos gargalo;
- atendimento da legislação ambiental;
- confiabilidade no prazo de entrega; e
- custo do produto.

Para alcançar a estratégia de manutenção, fazem-se necessários o mapeamento e a classificação dos equipamentos conforme a criticidade.

Na avaliação, os critérios para indicar os equipamentos são:

- risco ambiental;
- risco de acidente;
- índice de falhas (baixo MTBF);
- tempo entre reparos (alto MTTR);
- custo de manutenção;
- gargalo (capacidade limitada, sem equipamento reserva); e
- sistema informatizado.

A Tabela 2 apresenta o critério para cada gravidade da criticidade dos equipamentos em função do seu antecessor. Esta gravidade pode ser pequena ou grande na avaliação de cada departamento e/ou pessoa que estiver executando a avaliação.

Tabela 2 – Modelo para critérios de gravidade

<b>Gravidade do critério</b>	<b>Peso</b>
Muito pequena	1
Pequena	2
Média	3
Grande	4
Muito grande	5

Fonte: Fabro (2003).

Definindo o peso e a importância de cada critério, será necessário projetar uma matriz que correlacione os critérios, por meio do seu grau de importância e do peso de cada um deles, assim como os equipamentos do processo que se deseja classificar, conforme a criticidade indicada na Tabela 2.

Com isso, o estudo do algoritmo de criticidade é a base para a manutenção preditiva, evitando o uso da técnica em equipamentos que não agreguem valor para o processo, ou naqueles em que o custo de manutenção é muito baixo.

## 2.7 DELAY TIME

Neste capítulo será apresentado a base conceitual do *delay time* e suas técnicas de aplicação na indústria e outros seguimentos.

### 2.7.1 Delay time para único componente

Quando o assunto é *delay time* (DT), é importante destacar Christer (1982), que descreveu o intervalo entre a chegada do defeito até o momento em que o sistema falha. Didaticamente, atribui-se a parametrização  $h$  para este intervalo e  $u$  para o tempo de chegada do defeito, e, caso uma inspeção ocorra exatamente durante este estágio, realiza-se a substituição ou reparo do item.

As falhas são reveladas imediatamente, assim como o objetivo de inspecionar o equipamento, de estabelecer se o sistema está apresentando um defeito ou não e, se for o caso, de realizar alguma intervenção (antes da falha).

Scarf *et al.* (2019) afirma que o modelo clássico de *delay time* para um sistema de um componente foi estudado por uma política em que as inspeções surgem puramente ao acaso, de acordo com um processo de Poisson com uma taxa fixa.

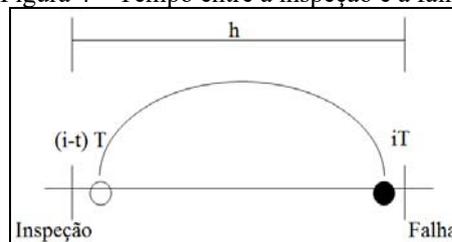
A modelagem do *delay time* para um único componente se caracteriza por apenas um modo de falha que domina o sistema, é o que é posto em análise para o modelo. Um sistema de componentes simples pode ser interpretado como, por exemplo, um motor elétrico, sistemas de sinalização, bombas centrífugas, motores elétricos etc. (BAKER *et al.*, 1993).

O modelo de *delay time* que considera as inspeções perfeitas para componente simples, com o tempo inicial de defeito não exponencialmente distribuído, é baseado nas seguintes hipóteses (WANG, 2008):

- o sistema é restabelecido tanto em uma manutenção de uma falha quanto na manutenção de um defeito identificado em uma inspeção;
- após a manutenção em uma falha ou em uma anomalia identificada na inspeção, o processo de inspeção se restabelece novamente;
- o tempo inicial de aparecimento do defeito aleatório tem a função densidade de probabilidade  $f(x)$ ;
- no componente defeituoso identificado na inspeção, será realizada a manutenção por um item reparável ou por um item cuja substituição possua um custo médio  $C_p$ .

Considerando essas hipóteses, representadas também na Figura 4, a seguir, determina-se o intervalo de inspeções que minimiza o custo total esperado em um ciclo de inspeções. Esse custo inclui o custo de inspeção ( $C_i$ ), o custo médio de reparar um defeito ( $C_p$ ) e o custo da falha ( $C_f$ ).

Figura 4 – Tempo entre a inspeção e a falha



Fonte: Wang (2012).

Para estimar o valor esperado do custo no tempo, pode-se utilizar a Equação 8, em que  $C(T)$  e  $L(T)$  podem ser determinados considerando duas possibilidades: se a falha ocorrer no intervalo  $(x + h \in [(i - 1)T])$  e se a falha não ocorrer no intervalo  $(x \in [(i - 1) T, iT])$ ;  $h > iT - x$ .

$$E(T) = \frac{C(T)}{L(T)} \quad (8)$$

O método *delay time modeling* (DTM) foi proposto por Christer (1982), tendo como objetivo solucionar problemas relacionados à manutenção em edificações. Tal conceito foi posteriormente aplicado em problemas envolvendo o contexto industrial, especialmente por Christer e Waller (1984).

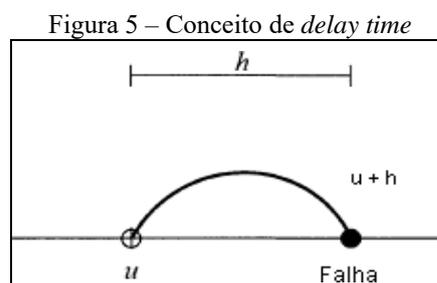
Para Christer *et al.* (1984), o conceito de *delay time* consiste em determinar o melhor momento para que haja a intervenção em um equipamento ou sistema, em face do surgimento de um defeito ou falha, antes que ocorra sua falha total.

Wang (2003) afirma que o modelo tem um conceito pragmático sendo amplamente utilizado por engenheiros com o objetivo de direcionar a tomada de decisão acerca das inspeções em linhas ou sistemas de produção os quais se encontram vulneráveis a processos de degradação.

Para tal, o DTM considera o item da modelagem de acordo com três estados:

- Estado (0): estado operacional normal;
- Estado (1): estado defeituoso; e
- Estado (2): falha.

De acordo com Christer (1999), o DTM de um defeito corresponde à letra *h* representando o tempo transcorrido desde o surgimento do defeito (*u*) até o momento da falha, conforme mostra a Figura 5, a seguir:

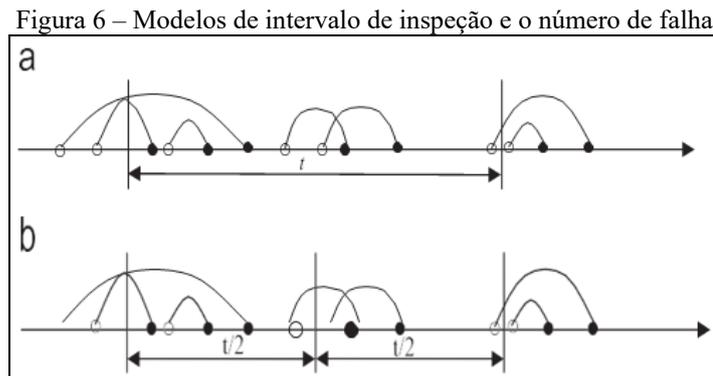


Fonte: Christer (1999).

O *delay time* *h* ocorre entre o surgimento do defeito *u* e a falha em (*u + h*) sofrida em um componente, equipamento ou sistema. O DT determina que o processo de falha de um equipamento percorre duas fases: na primeira fase, a máquina encontra-se operando normalmente havendo um ponto de defeito oculto identificado; na segunda fase, o DT

propriamente dito trata da identificação do ponto de defeito até a falha do equipamento (CHRISTER, 1999).

A Figura 6 demonstra que, desde que seja possível modelar a maneira como os defeitos surgem e o tempo de atraso associado  $h$ , o conceito de *delay time* pode capturar a relação entre o intervalo de inspeção e o número de falhas da planta.



Fonte: Wang (2012).

Com o surgimento do defeito, o DT proporciona ao gestor a remoção dele por meio da manutenção preditiva antes que a falha ocorra. Se um intervalo de inspeção de  $t$  ocorrer, conforme mostrado na Figura 6(a), três defeitos podem ter sido identificados e as sete falhas podem ter sido reduzidas para quatro. Da mesma maneira, se o intervalo de inspeção for reduzido para  $t/2$ , conforme mostrado na Figura 6(b), quatro defeitos poderão ter sido identificados, e as sete falhas poderão ter sido reduzidas para três. No item (a), um intervalo de inspeção maior de  $t$ , três defeitos foram identificados. E no item (b), um intervalo de inspeção menor de  $t/2$ , foram apontados quatro defeitos.

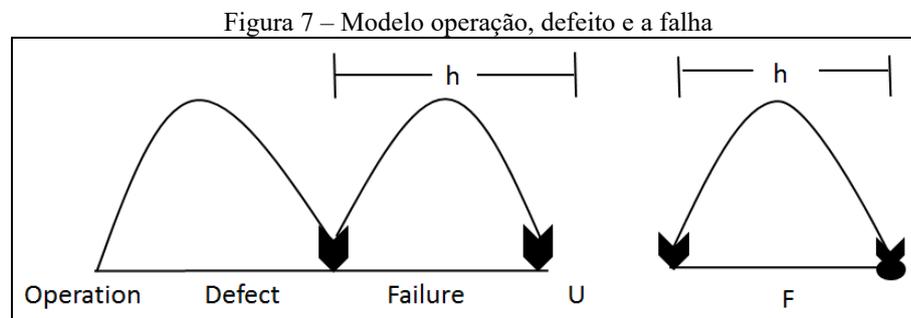
Wang (2012) explica que o *delay time* tem alguns modelos que podem ser aplicados e otimizados para diversas áreas. Os modelos baseados nele podem ser divididos em dois: um modelo de sistema complexo e acompanhado de componentes em que o fabricante se refere a um sistema com muitos modos de falha e, posteriormente, refere-se a uma comparação do sujeito a um único modo de falha.

As extensões nos modelos básicos de múltiplos componentes do sistema complexo já tiveram um desenvolvimento, o modelo de defeito perfeito que diminui o comprimento dos intervalos de inspeção. Com dois intervalos consecutivos de inspeção, o problema é para encontrar o melhor primeiro intervalo de inspeção, pois se sabe que, durante uma intervenção da manutenção planejada, algumas atividades, como troca de motor, lubrificação, limpeza e

ajuste etc., não são uma parte da inspeção ou do reparo das atividades, porque são destinadas a prevenir os defeitos antes de identificá-los (WANG, 2012).

O conceito DT foi primeiramente proposto por Christer (1976), e tem sido amplamente utilizado para definir políticas de manutenção. A proposta é encaminhar a um novo modelo para otimizar custos quanto a uma política de manutenção para pistas de aeroportos, fazendo uma análise de falhas e de desgaste e rasgo de uma pista de aeroporto, assim como aplicando o modelo proposto a um estudo de caso real em um aeroporto brasileiro.

A Figura 7, a seguir, mostra que o DTM considera que um sistema pode estar no estado operacional com defeito estado e estado da falha.



Fonte: Wang (2012).

Para Souza *et al.* (2020), a falha é dada por duas fases. A primeira delas está entre o estado de operação do equipamento e o ponto em que um defeito é detectado. Já a segunda fase ocorre no ponto em que o defeito é identificado até o equipamento entrar em falha.

O *delay time*, portanto, busca proporcionar uma oportunidade preventiva para que os defeitos sejam tratados antes das falhas, dentro de um intervalo que fornece o menor custo operacional e concentra-se na frequência das inspeções, em que a fase inicial da falha, chamadas falhas, pode ser notada.

Assim, se uma inspeção for realizada periodicamente dentro de um prazo predeterminado com faixa ideal, um defeito oculto pode ser observado, e a ação com o tempo de atraso representa uma janela de oportunidade para evitar uma falha.

A utilização da manutenção preventiva, portanto, é mais barata do que quando o mesmo problema é tratado do ponto de vista das falhas.

### 2.7.2 *Delay time* para planta complexa

O *delay time* em planta complexa é plantas que possuem muitos modos de falha, e o DTM de planta complexa é dividido em duas partes: inspeção perfeita, ou seja, todos os defeitos são identificados no processo de inspeção quando o mecânico vai fazer sua rotina de manutenção preventiva; e inspeção imperfeita, na qual os defeitos são identificados com certa probabilidade menor que um.

Segundo Wang (2012), para sistemas complexos, é realizada uma aproximação para que as chegadas de defeitos de todos os componentes sejam agrupadas e modeladas por um processo de ponto estocástico.

Se o número de componentes e modos de falha for grande, a aproximação acima é razoável, e foi validada por estudos de simulação e em exemplos de casos, também sendo assumido que os *delay time* de todas as falhas seguem uma distribuição idêntica. Para defeitos de pequenos componentes em uma visão de planta industrial, um sistema modificado, e  $F(h)$  indica que o *delay time* possui uma contribuição de todos os fracassos, sendo que os números esperados dentro de um intervalo de inspeção  $t$  são dados pela Equação 9:

$$EN_F(\tau) = \int_0^{\tau} \lambda F(h) dh. \quad (9)$$

Esta expressão é utilizada em diversos os modelos com várias extensões. Na Equação 10, explicitamente é estabelecida a relação desejada entre os números esperados das funções e o intervalo de inspeção. Normalmente usados nos modelos baseados no *delay time*, tomam uma forma de:

$$D(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E(\text{Downtime over } T)}{T} = \frac{d_f EN_F(t) + d_s}{t + d_s} \quad (10)$$

Sendo que:

$d_f$  é o desempenho médio do tempo de inatividade;

$d_s$  é o tempo de inatividade durante a inspeção.

A Equação 10 pode ser minimizada como Equação 9 podem ser computados, e  $d_f$  e  $d_s$  são conhecidos.

### 2.7.3 DTM com inspeção perfeita

Esse é um modelo básico de DTM. Christer (1999) apresenta as hipóteses para modelagens desse tipo de modelo:

- uma inspeção é realizada a cada unidade de tempo  $T$ , a um custo de  $C_i$  e requer um tempo  $d$  *downtime* de inspeção para ser realizada, sendo  $d < T$ ;
- as inspeções são perfeitas em todas as suas formas, ou seja, defeitos presentes serão perfeitamente identificados;
- os defeitos identificados serão corrigidos imediatamente, durante o tempo da inspeção;
- o ponto inicial de surgimento do defeito na planta é assumido como sendo uniformemente distribuído no tempo desde a última inspeção e independente de  $h$ ;
- os defeitos surgem a uma taxa  $\tau$  constante;
- a função densidade de probabilidade do *delay time*  $f(h)$  é conhecida;
- a planta industrial tem que ter operada por um longo tempo para ser considerada efetivamente em regime permanente;
- defeitos e falhas apenas surgem quando a planta está em operação.

Essas características de problema dentro da manutenção mais simples com inspeção não rotineiras (CHRISTER *et al.*, 1995) só poderão ser acordadas depois de uma cuidadosa análise e investigação da situação dos componentes.

A partir dos quatro primeiros itens supramencionados, é obvio que o número de falhas do sistema é idêntico e independente em cada intervalo de inspeção, e pode simplesmente estudar o comportamento de um processo de falha do sistema ao longo de um intervalo, ou mesmo no primeiro intervalo  $[0, T]$  (WANG, 2008).

Segundo Wang (2008), a função de distribuição de probabilidade do *delay time*  $f(h)$  segue uma distribuição exponencial. Se a taxa de falha  $f(h)$  é constante ao longo de um período de tempo especificado, então a probabilidade de um defeito falhar  $b(t)$  pode ser expressa pela Equação 11:

$$b(t) = \int_0^t \left( \frac{t-h}{t} \right) f(h) dh \quad (11)$$

É importante notar que  $b(t)$  é independente de taxa de chegada de defeitos  $\lambda$  mas depende de *delay time*  $\lambda$ . E o *downtime*  $D(T)$  esperado é expresso pela Equação 12.

$$D(T) = \frac{d + \lambda t d(t) d_f}{t + d} \quad (12)$$

Sendo:

$d$ : o *downtime* (tempo de inatividade) em razão da inspeção;

$\lambda$ : a taxa de chegada de defeito;

$b(t)$ : a probabilidade de um defeito falhar;

$d_f$ : o *downtime* médio para reparação da falha; e

$t$ : o período de inspeção.

Custo  $C(T)$  esperado através da Equação 13:

$$C(T) = \frac{T \lambda \{C_f b(T) + C_p [1 - b(T)]\} + C_i}{T + d} \quad (13)$$

Sendo:

$C_f$ : o custo de reparar a falha;

$C_p$ : o custo de reparar um defeito; e

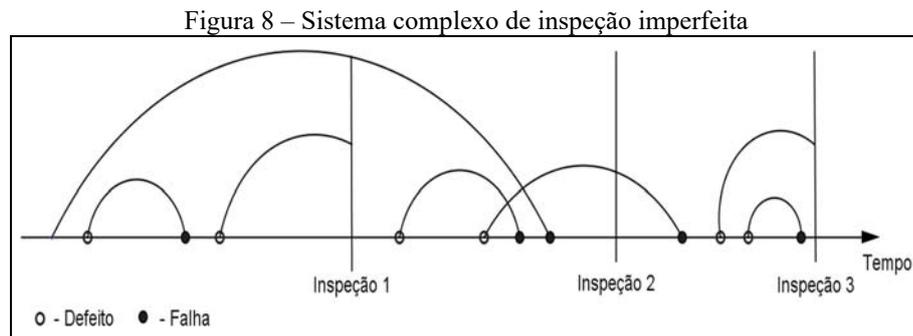
$C_i$ : o custo de inspeção.

#### 2.7.4 DTM com inspeção imperfeita

Na inspeção imperfeita, o estado de funcionamento do sistema identificado na inspeção pode não ser sua verdadeira condição. Pode haver circunstâncias em que a inspeção não é suficientemente eficaz e nem economicamente justificada (SCARF *et al.*, 2019).

Para um modelo pode ser levado em considerações todas as variáveis possíveis no modelo de inspeção imperfeita, exceto o de controlo perfeito. Define-se que, se um defeito está presente num sistema, então há uma probabilidade “ $r$ ” que o defeito pode ser identificado (WANG, 2008).

Isto implica que existe uma probabilidade “ $1 - r$ ” que o defeito será despercebido, na Figura 8 descreve um processo de falha de um sistema multicomponente, submetido a três inspeções, em que duas falhas foram identificadas e removidas e duas não foram possíveis de serem identificadas.



## 2.8 CONHECIMENTO *A PRIORI*

O significado do termo *a priori* vem antes de ser realizado qualquer experimento somado a uma distribuição a uma probabilidade *a priori* através de ajudas de especialistas em qualquer seguimento ou área de atuação (SOUZA, 2002).

Neste contexto de estatística, chamada Bayesiana, Campello *et al.* (2002) apresentaram algumas características empíricas ou subjetivas, a saber:

- é um raciocínio probabilístico quantitativo baseado em axiomas que fornecem limitações de coerência e consistência dos dados;
- as estimativas são construídas a partir de crenças individuais ou experiências passadas podendo ser julgadas de acordo com a preferência ou intuição do indivíduo que esteja avaliando;
- as probabilidades descrevem em graus de lógicas ou psicológicas de atrás de uma crença ou sistema intencional.

Quando utilizada uma abordagem bayesiana é porque normalmente não dispõe de informação suficiente para a construção do modelo com parâmetros de uma distribuição de probabilidade que evidencia as experiências anteriores (CAVALCANTE; ALMEIDA, 2005).

Quando se tem informações suficientes para a construção de algum modelo pode-se considerar variáveis aleatória que buscam informações *a priori* acerca do seu comportamento probabilístico em uma credibilidade subjetiva. O termo *a priori* significa antes de se fazer qualquer experimento. A atribuição dessa probabilidade *a priori* é feita por meio de protocolo de elicitação especialistas (SOUZA, 2002).

De acordo com Martz e Waller (1982), com base na experiência do decisor ou através de observações realizadas ao longo de anos de conhecimento *a priori* por um especialista, as

quais somadas a um conhecimento de um determinado assunto específico pode ser tratado quantitativamente, por meio de uma distribuição de probabilidades *priori*.

Segundo Paulino *et al.* (2003), diante do ponto de vista lógico, a própria distribuição *a priori* corresponde a uma informação *a priori* real é diretamente quantificada, a resultante da atualização bayesiana por essa informação *a priori* objetivamente representável, de uma distribuição materializando um estado de completa ignorância *a priori*.

Já em 1973, James Bernoulli foi o primeiro a descrever que a probabilidade do grau de confiança (“grau de crença”) que uma pessoa associa algum evento incerto que se depende do seu conhecimento, e pode variar de pessoa para pessoa.

Para a obtenção de probabilidade *a priori* sobre o parâmetro de interesses ao conhecimento *a priori*, é possível aplicar procedimentos para determinar o método de obtenção das informações dos especialistas.

Kadane (1980) explica que o método estrutural para qualquer método de elicitación para distribuição *a priori* de um parâmetro qualquer, se baseia em questões relacionadas diretamente aos parâmetros.

Já O’Hargan (1998) refere dois princípios que acredita serem os mais importantes para a elicitación, quais sejam:

- realizar perguntas que sejam entendidas pelos especialistas em uma linguagem simples e de fácil entendimento;
- encontrar e elicitar separadamente as principais fontes de incertezas.

### 3 PROPOSTA DE MODELO DE PERIODICIDADE DE INSPEÇÃO COM MÚLTIPLOS MODOS DE FALHA

Neste capítulo, demonstra-se uma proposta de procedimento para a implantação em qualquer empreendimento que tenha políticas de manutenção com inspeção preditiva, por meio de um fluxograma e um roteiro de passo a passo para sua aplicação.

Este método poderá ser aplicado sem uma base histórica dos equipamentos, somente levantando os custos de manutenção e o conhecimento *a priori*. Este estudo pode ser adaptado para a realidade de qualquer equipamento que venha ter manutenção preditiva. Poderão ser criadas rotas de inspeção e periodicidade dos equipamentos de acordo com o modelo.

#### 3.1 LEVANTAMENTO DOS EQUIPAMENTOS MONITORÁVEIS

Nesta primeira etapa do processo, é realizado o levantamento dos equipamentos que já possuem algum tipo de monitoramento no parque fabril, pois, normalmente, essa técnica de *delay time* pode ser aplicada na manutenção preditiva com um todo, na análise de vibração, termografia, análise de óleo, e ultrassom.

Para determinar os equipamentos, a escolha deve ser aquela que possuem uma manutenção complexa, seu custo de manutenção elevado, ser altamente crítico para o processo produtivo da planta, que afetam o meio ambiente, ou que seja algum equipamento que pode parar uma etapa do processo de fabricação.

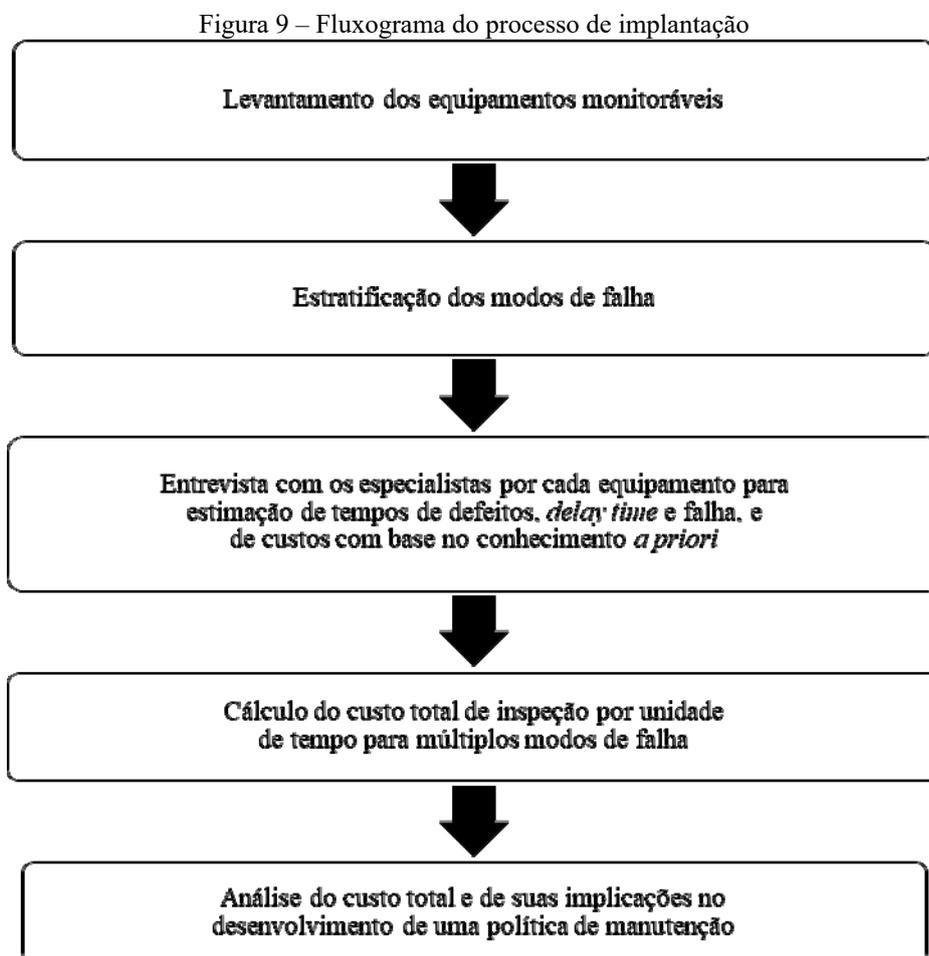
#### 3.2 ESTRATIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA

Nessa etapa do processo, os gestores e os técnicos especialistas ajudam a elaborar um plano dos equipamentos monitoráveis. Outra questão que pode ser levada em consideração é a condição e o histórico de falha dos equipamentos durante sua vida útil.

O próximo passo, já com os equipamentos catalogados por intermédio do estudo de criticidade, é realizar o estudo dos modos de falha dos equipamentos. Os dados de falha podem ser estratificados por meio de um sistema de manutenção ou de planilhas de controle que toda empresa deve possuir, visto que existem equipamentos de diversos tipos, tais como: motores, bombas, mancais, redutores e exaustores, e cada equipamento possui inúmeros modos de falha.

Em um motor, por exemplo, podem existir defeitos, como, por exemplo: defeito no rolamento, desalinhamento, folga na base, problema elétrico, desbalanceamento e folgas mecânicas. Em um redutor, existem diferentes modo de falha, tais como: dentes quebrados nas engrenagens, folga no engrenamento, desalinhamento nas engrenagens, problema no lubrificante, rolamentos danificados e desalinhamento entre o eixo de tração e o motor.

Em todos os equipamentos que entrarem para a rota de monitoramento e para construção do modelo baseado do *delay time*, é fundamental estratificar todos os modos de falha dos equipamentos. Uma ferramenta de qualidade muito utilizada é a FMEA, que poderá guiar o profissional na construção dos modos de falha de todos os equipamentos monitoráveis. A Figura 9 mostra um fluxograma do passo a passo para executar o modelo.



Fonte: O autor (2021).

### 3.3 ENTREVISTA COM OS ESPECIALISTAS

A entrevista com os especialistas é um processo importante para ajudar no desenvolvimento da construção do modelo de periodicidade do *delay time*. Com eles, é

possível “prever” um cenário em que os equipamentos podem entrar em falha, ou seja, a paralização da sua função primária, e afetar a produção. Os especialistas são profissionais com tempo de experiência mais elevado que os outros profissionais e que tenham cursos específicos para cada tipo de equipamento.

Por serem demandados trabalhos específicos para esses profissionais em equipamentos críticos ou de alta complexidade, a entrevista com eles é fundamental para ajudar no processo como tomador de decisão na criação do modelo proposto.

Diante de todas essas informações iniciais, conforme mostra o fluxograma do processo de implantação dessa metodologia (Figura 9), as entrevistas com os especialistas dos equipamentos tornam-se muito importantes como o conhecimento *a priori*.

Nessa etapa, o responsável por implantar o método de inspeção por *delay time* deve se reunir com todos os especialistas de cada equipamento e realizar uma entrevista em um local calmo e sem interferência externa para que a decisão dos especialistas não sofra distorções.

É recomendado utilizar mais de um especialista para tentar confrontar as informações, e discutir as principais falhas dos equipamentos monitoráveis.

Quando houver uma divergência de resultados entre os especialistas referente ao período de falha do equipamento, é importante reunir informações adicionais, tais como: histórico de falha dos equipamentos com maior riqueza de detalhes; marca dos subcomponentes que entrou em falha, se são originais ou peças remanufaturas; controle de manutenção preventiva referente à periodicidade; responsáveis pelas inspeções; velocidade; e carga de trabalho, juntando o maior número de informações relevante para o estudo do equipamentos.

A partir de todas essas informações, faz-se necessária uma nova reunião com os especialistas para discutir detalhes dos laudos e das informações levantadas posteriormente.

Após isso, é um processo natural os especialistas chegarem a um senso comum, porque, normalmente, os equipamentos, após um período de funcionamento, apresentam comportamento padrão de produtividade. O que ocorre muitas das vezes é uma interferência humana ou uma variação anormal de carga ou pressão no equipamento, podendo afetá-lo na sua condição normal.

Para obter o conhecimento *a priori* dos especialistas, recomenda-se considerar os gráficos de tendências a partir do histórico de medição por análise de vibração baseado no modo de falha do equipamento por meio dos laudos da manutenção preditiva.

Foi adotada uma metodologia para registrar as entrevistas com o intuito de não obter interferências externas no processo de escolha. Esta metodologia criada consiste, por exemplo, em um motor com laudo de análise de vibração que constata um problema no

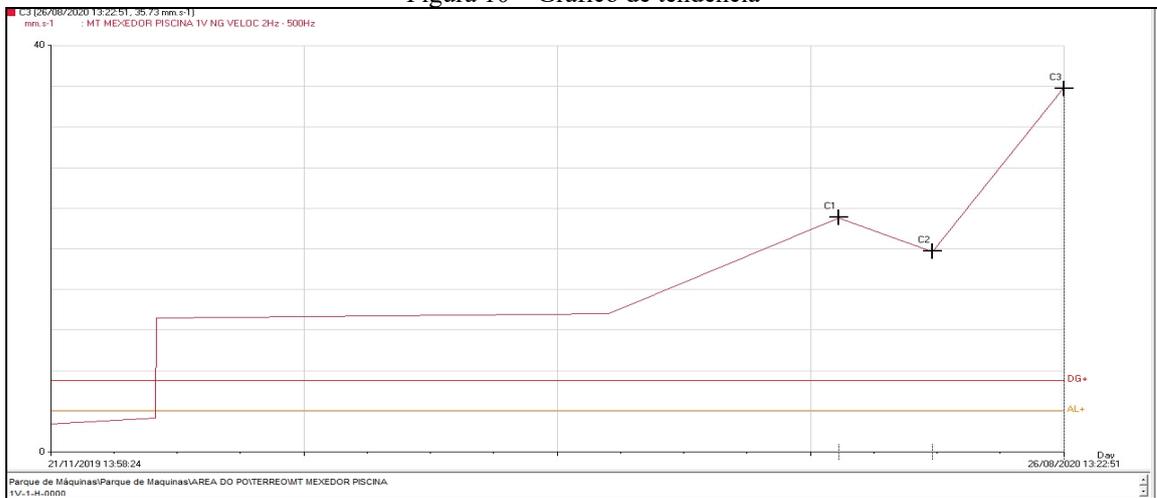
lubrificante, em quantos dias ele poderá entrar em falha no modo mais pessimista, no modo mais provável, também no modo otimista.

Dado o gráfico de tendência de alta (Figura 10) e os espectros em aceleração ( Figura 11) e em velocidade (

Figura 12), na possibilidade deste equipamento vir a falhar, em uma condição de análise crítica, em uma condição de atenção e em uma condição em modo conservador, o especialista poderá preencher (

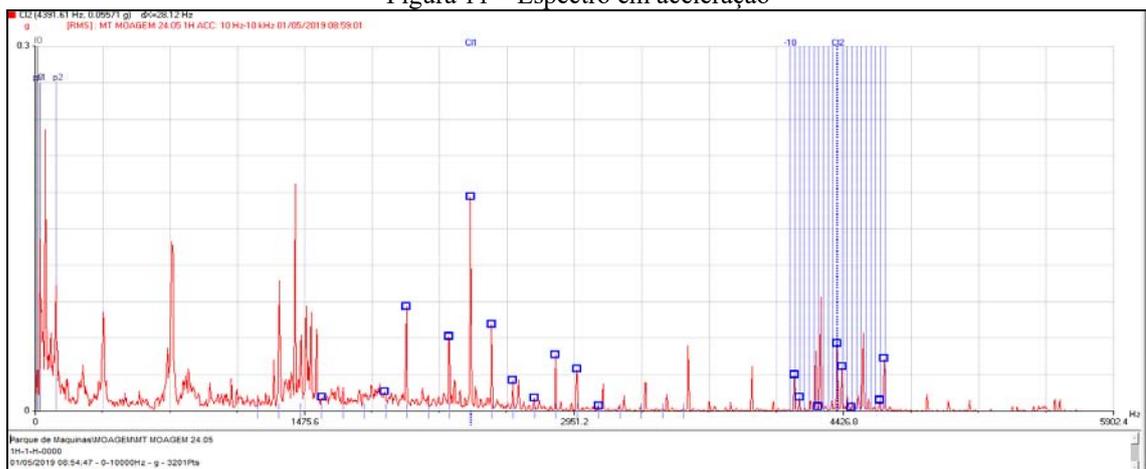
Tabela 3).

Figura 10 – Gráfico de tendência



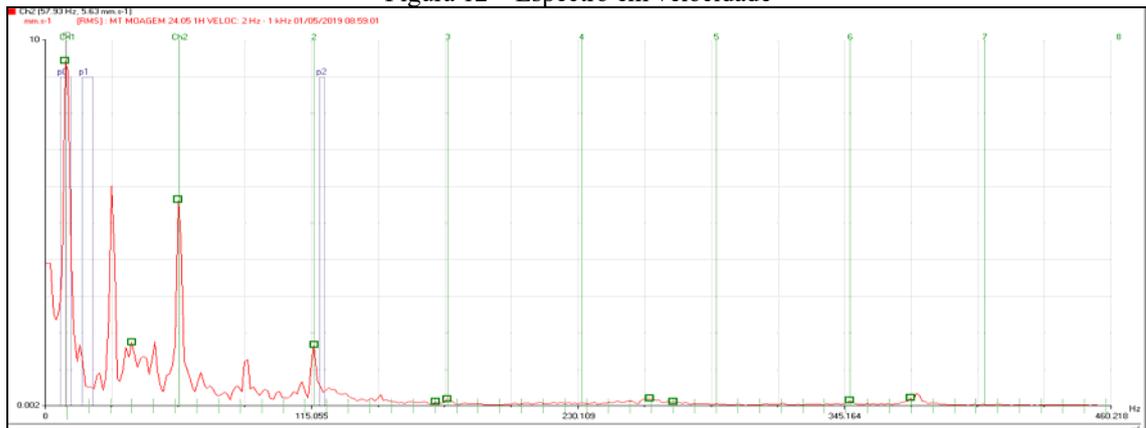
Fonte: O autor (2021).

Figura 11 – Espectro em aceleração



Fonte: O autor (2021).

Figura 12 – Espectro em velocidade



Fonte: O autor (2021).

Questionário com a estratificação dos modos de falha e o campo ao lado para o especialista preencher em dias.

Tabela 3 – Comparação dos sistemas para a implementação da MCC

		Modo crítico	Modo atenção	Modo conservador
Motor da masseira	Lubrificação			
	Folga			
	Desalinhamento			
	Rolamento			
	Batimento de correia			
	Parafuso folgado			

Fonte: O autor (2021).

Nos gráficos apresentados (figuras 10 a 12), quando o equipamento atinge um limite superior ou de atenção, o laudo é enviado para o departamento responsável para sua intervenção. Nesse intervalo de tempo é fundamental a ajuda dos especialistas em cada tipo de equipamento a estimar qual é a possibilidade em dias que este equipamento pode sofrer uma falha catastrófica.

Os parâmetros da distribuição triangular que devem ser estimados levam em consideração uma visão pessimista, mais provável e otimista do tempo de duração do *delay time* de cada modo de falha dos equipamentos.

Esse método é fundamental para estimação da distribuição de probabilidade  $f(h)$  que representa o *delay time* em um modelo aplicado como distribuição triangular. Considerando essa dificuldade, foi assumido que  $f(h)$  seguiria uma distribuição triangular, e os especialistas com base no conhecimento prévio do histórico de inspeções e de laudos preditivos são capazes de estimar os valores dos parâmetros desta distribuição.

O método recomendado da entrevista mostra gráficos de tendências (Figura 10), parâmetros de análise de vibração, histórico dos equipamentos referente às preventivas. Junto

com os modos de falha, discutia-se como período de cada falha, e repetia-se esta entrevista para cada especialista de motores, redutores, bombas, mancais e compressores.

### 3.4 CÁLCULO DO CUSTO TOTAL

Na etapa do cálculo do custo total, faz-se necessário o levantamento dos valores de custo para analisar e melhorar a periodicidade de inspeção dos equipamentos, pois eles têm o intuito de garantir uma probabilidade para que os equipamentos não venham a falhar por inúmeros modos de falha. Para calcular o  $b(t)$  e o  $C(t)$ , utiliza-se a Equação 14. De acordo com Christer (1984), o  $b(t)$  é a probabilidade de um defeito evoluir para uma falha antes de ser observado em uma inspeção:

$$b(t) = \int_{h=0}^t \left( \frac{t-h}{t} \right) \cdot f(h) dh \quad (14)$$

Sendo:

$t$ : o período de inspeção;

$h$ : de um dado que fez o defeito surgir; e

$f(h)$ : a estimativa subjetiva da função densidade de probabilidade do *delay time*  $h$ .

Nesta dissertação, está sendo assumido que  $f(h)$  pode ser representada por uma distribuição triangular. Essa premissa ajuda na estimação do conhecimento *a priori* junto aos especialistas. Para uma distribuição triangular, tem-se:

$$\begin{cases} 0 & \text{for } x < a \text{ ou } a \leq x < c, \\ \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 & \text{for } x = c, \\ \frac{2}{(b-a)} & \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 & \text{for } c < x \leq b \text{ ou } b < x, \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(c-a)} & \end{cases}$$

Após o levantamento dos parâmetros de  $b(t)$ , é possível estimar o valor esperado do tempo de indisponibilidade (*downtime*) entre inspeções, representado por  $D(T)$ , e o custo esperado total de manutenção entre inspeções  $C(T)$ .

Para  $D(T)$ , é necessário informar o parâmetro do tempo médio de reparo do ( $bd$ ), salientando que deve sempre ser considerado o histórico de MTTR dos equipamentos, que normalmente encontra-se em algum sistema de manutenção dentro da indústria. Se não conseguir, pode-se utilizar os laudos de manutenção preditiva, pois cada laudo seria uma falha no equipamento e através desse levantamento de falhas/laudos de manutenção preditiva. De acordo com Christer (1984), encontra-se o  $D(T)$  dado pela Equação 15:

$$D(T) = \frac{1}{(T + d)} [k \cdot T \cdot d_b \cdot b(T) + d] \quad (15)$$

Sendo:

T: o período de inspeção;

K: o número de defeitos por período de inspeção;

d: o tempo que demora para ser realizada a manutenção no equipamento; e

db: o tempo que demora para a corretiva em dias.

No cálculo referente ao custo esperado para inspecionar o equipamento no período, T é  $C(T)$ . Esse custo de inspeção pode ser calculado para cada tipo de falha. De acordo com Christer (1984), tem-se a Equação 16:

$$C(T) = \frac{1}{(T + d)} [k \cdot T \{C_b \cdot b(T) + C_i [1 - b(T)]\} + I] \quad (16)$$

Sendo:

$C_b$ : o custo médio do equipamento após a falha;

$C_i$ : o custo médio para consertar o equipamento; e

I: o custo médio para inspecionar o equipamento.

Com esses cálculos, é possível identificar o melhor período para inspecionar o equipamento dentro de uma margem de segurança que se relacione ao custo de reparação e ao custo após a falha, tendo em vista que o custo para inspecionar os equipamentos é fixo para cada equipamento.

### 3.5 ANÁLISE DO CUSTO TOTAL E SUAS IMPLICAÇÕES

Na etapa anterior, é possível encontrar um  $C(T)$  para cada modo de falha, entretanto o tempo ótimo de inspeções pode ser diferente se for calculado um  $C(T)$  para cada modo de falha.

A contribuição desta pesquisa é assumir que os custos de manutenção para cada modo de falha são independentes e podem ser somados para representar o custo total, conforme expressa a Equação 17.

$$C_t(T) = \sum_{j=1}^n C_j(T) \quad (17)$$

Sendo:

$C_t$ : o custo total esperado de manutenção considerando múltiplos modos de falha;

$C_j$ : o custo total esperado de manutenção considerando um único modo de falha;

$n$ : a quantidade de modos de falha considerados de um equipamento; e

$j$ : um índice da quantidade de modos de falha considerados de um equipamento.

Para uso do modelo, deve-se analisar os custos de cada equipamento e suas implicações. Uma decisão importante neste ponto é se realmente os equipamentos poderão sofrer alterações mediante uma política de manutenção já implantada na empresa.

Deve-se avaliar se esses equipamentos podem sofrer alterações quanto à sua periodicidade de inspeção e flutuações de carga ou o método de produção sofre variações de velocidade.

Em alguns casos, a análise dos custos de parada de equipamento ou custo da produção é fundamental para a tomada de decisão para apresentar o melhor método de inspeção, otimizando tempo, custo e qualidade na análise de vibração. Com o resultado do modelo, é possível indicar para a empresa a necessidade adequada de investimento para uma política efetiva de manutenção preditiva.

## 4 ESTUDO DE CASO

Neste trabalho, foi utilizada uma base histórica de nove anos de monitoramento, com periodicidade mensal e bimestral, tendo como objeto de referência os laudos enviados para o cliente como uma característica de falha. Esta base histórica de monitoramento se deu por meio do *software* que gerencia e grava cada coleta de análise de vibração em campo de cada equipamento específico.

Os dados do estudo de caso foram coletados no período de maio de 2010 até julho de 2019, considerando o número de laudos de análise de vibração enviados para o cliente, que ficou caracterizado como uma falha do equipamento, diferenciando o modo de falha.

De acordo com a quantidade de laudos durante os anos de monitoramento, com essa base nesse critério, utilizou-se o potencial de falha em forma probabilística, mediante os laudos emitidos com potenciais de falha do equipamento.

O processo da periodicidade dos equipamentos foi construído por via de um algoritmo, levando em consideração se o equipamento afetava o meio ambiente, a segurança ou a qualidade, causando distorções em quais eram realmente os equipamentos que poderiam ter a legibilidade para o monitoramento.

Alguns equipamentos são extremamente críticos para o processo e não possuíam nenhum método de monitoramento. Já outros equipamentos têm o custo de manutenção muito baixo, não compensando realizar a inspeção por análise de vibração por ser uma técnica de manutenção de alto valor agregado.

Os intervalos de inspeção considerados foram 10, 20, 30, 40, 50 e 60 dias, por conveniência. Esses períodos são desmembramentos das rotas utilizadas anteriormente como rotas mensais e rotas bimestrais.

Com base no conceito de *delay time*, foram calculados os percentuais de probabilidade de falha no período por inspeção e outra por ano. Ao utilizar o referido método de manutenção preditiva, foram levados em consideração o custo por inspeção, o custo da falha e o custo do reparo, caso a falha viesse a ocorrer. Diante de tais fatores, o processo do modelo e da estrutura da proposta é transformar a inspeção em uma proposta rentável para a empresa.

Nesse contexto, a técnica *delay time* torna-se um método capaz de estruturar um formato de inspeção nos equipamentos para estabelecer o melhor momento para a referida inspeção.

O estudo de caso foi realizado em uma indústria de massas e biscoitos, em que, atualmente, são monitorados 1.700 equipamentos, com periodicidade mensal e bimestral.

A periodicidade mensal é utilizada em equipamentos críticos para o processo. Já a periodicidade bimestral é utilizada para equipamentos que possuem *backup*, como bombas de torre de resfriamentos, compressores, redutores de baixa rotação e mancais de baixa rotação. Esses equipamentos normalmente não afetam a produção, nem a qualidade e o meio ambiente, porque, na indústria, esses equipamentos possuem reservas, ou seja, quando parar por falha mecânica ou elétrica, existem outro pronto para realizar a mesma função ou, até mesmo, de maneira automatizada, entra outro equipamento.

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

A empresa retratada no presente trabalho encontra-se localizada na Região Metropolitana do Recife, no estado de Pernambuco, tendo como início de produção a linha de massas alimentícias, expandindo seu portfólio ao longo dos anos, e, atualmente, a mesma fábrica mais de cem produtos cadastrados.

A estrutura física da empresa compreende um parque industrial de 90.000 m<sup>2</sup>, duas fábricas com tecnologia de ponta na Região Metropolitana do Recife e três filiais nos estados da Paraíba, do Rio Grande do Norte e da Bahia, empregando diretamente cerca de 2.800 funcionários.

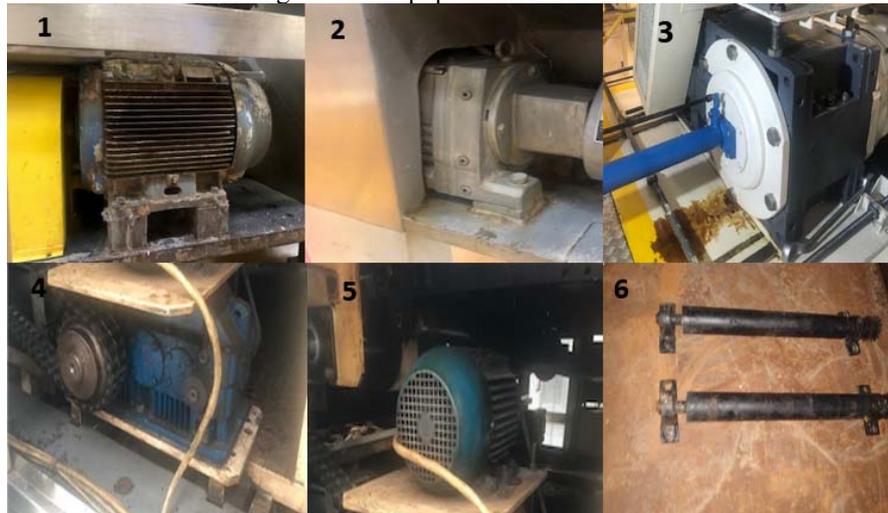
A missão da empresa é fornecer alimentos acessíveis à sociedade, com qualidade que atenda e supere as expectativas dos clientes e dos consumidores, tendo como valores: comprometimento e dedicação; respeito e desenvolvimento das pessoas; trabalho em equipe; simplicidade e agilidade; austeridade; lucro como fator de desenvolvimento; relacionamento com os fornecedores e a comunidade; e satisfação dos clientes e consumidores.

A indústria tem treze linhas de produção, dentre elas, são fabricados biscoitos recheados, biscoitos laminados, *wafers* e macarrão.

#### 4.2 EQUIPAMENTOS E LINHAS DE PRODUÇÃO

Os equipamentos que serviram de estudo fazem parte de um conjunto de máquinas que têm a capacidade de rodar continuamente 24 horas por dia, durante todo o ano. Esses equipamentos fazem parte do sistema crítico das linhas de produção, ou seja, se qualquer equipamento monitorado pela manutenção preditiva é extremamente crítico para o processo, uma quebra por falha pode acarretar grandes prejuízos, como baixa de produção e custos elevados de manutenção. Esses equipamentos estão listados na Figura 13.

Figura 13 – Equipamentos estudados



Fonte: O autor (2021).

Os equipamentos estudados foram:

- 1) motores das masseiras: transmitem força para os redutores;
- 2) redutores das masseiras: transmitem força para o sistema das bateladas de massas;
- 3) redutores da linha 4000: transmitem força para as extrusoras a produção de massas;
- 4) redutores dos fornos: transmitem esteiras metálicas dos fornos com comprimentos entre 10 e 25 metros;
- 5) motores dos fornos: transmitem força para os redutores dos fornos; e
- 6) mancais dos fornos: mantém a esteira sustentada como apoio e ajuda no transporte dos biscoitos.

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO E PRINCIPAIS DEFEITOS E MODOS DE FALHA EM FMEA

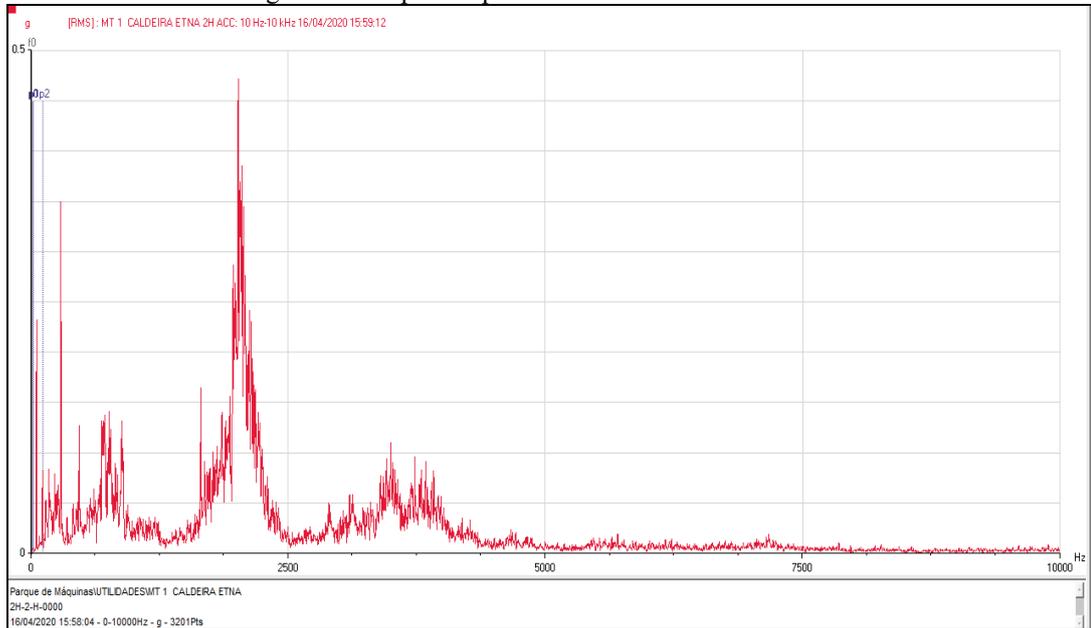
A partir dos equipamentos que foram estudados, como redutores, motores, bombas, mancais e exaustores dentro da técnica de análise de vibração, consegue-se descobrir os modos de falha de cada equipamento e, juntamente com a FFT, saber qual é o componente que originou a falha dentro deste equipamento.

Todo e qualquer equipamento rotativo gera frequência dada em Hz, e, com essa frequência gerada pelo equipamento sendo interpretada, pode-se descobrir a origem da falha. Com isso, é possível reduzir o custo de manutenção após prever a falha.

Em um motor, por exemplo, os modos de falhas que a análise de vibração pode identificar são: defeito na pista interna do rolamento, defeito na pista externa do rolamento, defeito na esfera do rolamento, defeito na gaiola do rolamento, e também, quando se trata de

defeitos com picos em alta frequência, tem o problema de lubrificação dos rolamentos como mostra na Figura 14.

Figura 14 – Espectro que mostra a falha de um rolamento



Fonte: O autor (2021).

Esse defeito é muito comum por se tratar de picos aleatórios sem uma padronização. Problemas elétricos acontecem por conta da frequência de 120 Hz, e muito comuns são os problemas estruturais, como desbalanceamento, desalinhamento, folgas, esses modos de falha acontece em baixas frequências.

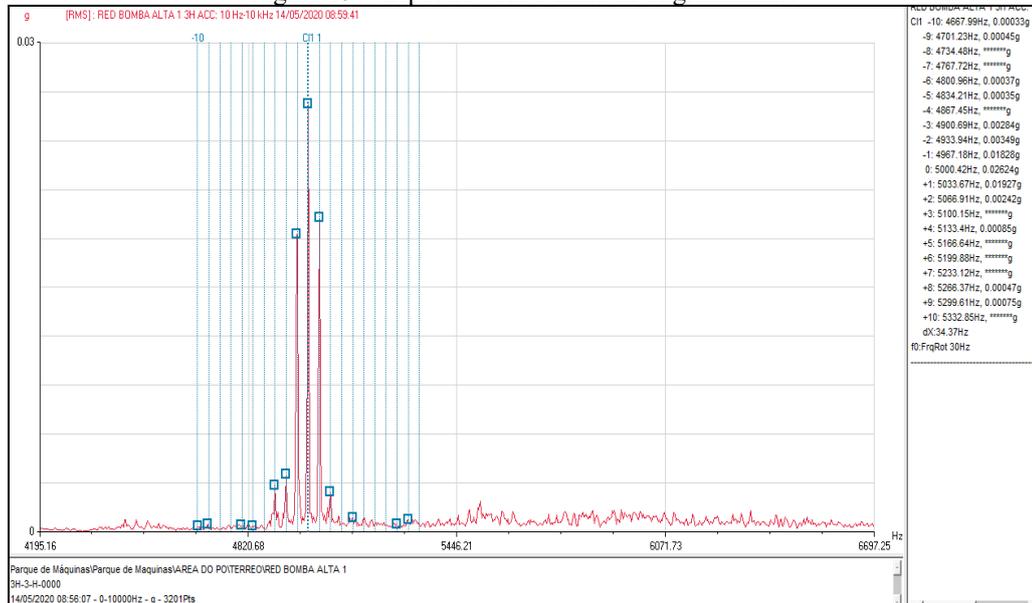
Os redutores de velocidade são um conjunto de engrenagens que trabalham dentro de uma caixa metálica (carcaça) com o objetivo de transmitir potência e mudar a velocidade de rotação em equipamentos industriais.

Em análise de vibração, seus modos de falha de rolamento são os mesmos que um motor elétrico, por ser uma característica da construção do rolamento e nesse caso. Para defeitos de engrenagens, é calculada a frequência de engrenamento para cada tipo de engrenagens. Esse cálculo parte da frequência de rotação do equipamento multiplicado pelo número de dentes, e, por meio dessa contagem, consegue-se identificar a frequência do engrenamento, conforme a Equação 18.

$$\text{freq}(\text{eng}) = \text{freq. de rotação} \times \text{número de dentes} \quad (18)$$

Depois disso, identificam-se os modos de falha de engrenamento (Figura 15), tais como: dentes quebrados, desalinhamento de engrenagens, folga nas engrenagens e roçamento entre partes mecânicas.

Figura 15 – Espectro com a falha no engrenamento



Fonte: O autor (2021).

Com base na análise de vibração e nos seus espectros de falha dos equipamentos estudados, como as bombas centrífugas são utilizadas para o transporte de líquidos através da conversão de energia cinética de rotação para a energia hidrodinâmica do fluxo do líquido.

O modo de falha em análise de vibração das bombas centrífugas é bastante particular, porque elas sofrem muito com problemas de cavitação e apresentam espectros muito parecidos com problemas de lubrificação e espectros com picos aleatórios em alta frequência. Porém, a frequência de passagem de pás é apresentada no espectro turbulência hidráulica e é evidenciada nos espectros também com picos aleatórios abaixo da rotação do equipamento.

A frequência de passagem das pás, número de pás ou vãos é multiplicada pela rotação do equipamento. Essa frequência é comum em bombas, ventiladores, sopradores e compressores, porém, a presença dessa frequência de passagem das pás não indica necessariamente um problema. Contudo, vale salientar que, evidenciadas grandes amplitudes, podem gerar espectros seguidos de harmônicos da rotação do equipamento, podendo coincidir com uma frequência natural e, com isso, causar altas amplitudes de vibração.

Exaustores ou circuladores têm a função de fazer a retirada de gases ou a alimentação de oxigênio para forno, caldeira, sistema de ventilação, e os modos de falha para esses

equipamentos normalmente têm desbalanceamento ou problema de rolamentos e folgas estruturais.

O modo de falha para os rolamentos do exaustor tem a mesma característica do motor, mas os modos de falha muito comuns para esse equipamento são o desbalanceamento do rotor, que se constitui em uma diferença de massa que gera uma vibração elevada com grandes amplitudes.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DAS POLÍTICAS DE INSPEÇÃO VIGENTES (PERIODICIDADE E SISTEMÁTICA)

De acordo com Maia (2019), no *start* da planta, não existia um plano de inspeção e nem a cultura da manutenção preditiva implantada na companhia, pois, no começo, todo o processo de monitoramento era no sentimento de cada gestor e técnicos de manutenção de cada linha de produção determinava quais equipamentos eram monitorados.

Como processo inicial de monitoramento para melhorar a padronização nas rotas de inspeções, foi criado um algoritmo de criticidade com a média ponderada para todos os equipamentos, e assim se seguiu.

A periodicidade dos equipamentos levou em consideração alguns critérios, como, por exemplo, se os equipamentos afetavam a segurança alimentar ou a segurança de colaboradores, esses ativos são classificados como extremamente importantes sobre o ponto de vista da segurança alimentar ou segurança dos profissionais como equipamentos que podem ferir alguém ou vaziar óleo, contaminando os produtos.

Nos geradores que operam sempre em *stand by*, se houver uma falta de energia na planta, é de extrema importância eles entrarem em operação. Equipamentos que podem afetar o meio ambiente são equipamentos que normalmente estão localizados na estação de tratamento de efluentes (ETE) ou no departamento de utilidades, e são responsáveis por todo tratamento químico dos resíduos e da água industrial. Equipamentos que afetam a produtividade são um dos fatores mais importantes para determinar se o equipamento é crítico ou não.

Um equipamento que pode afetar a produtividade em uma planta industrial deve conter na política de manutenção não só a manutenção preditiva, mas também a manutenção preventiva para assegurar que ele realmente não irá ter problema. Normalmente, são motores e redutores de acionamento principal que se classificam nesse quesito (MAIA, 2019).

A capacidade de manutenibilidade dos equipamentos trata-se de equipamentos robustos que precisam de grandes paradas de manutenção, rolamentos especiais e engrenagens importadas. Equipamentos com um grau de manutenibilidade elevada são extremamente críticos, e uma quebra deste equipamento em uma linha de produção pode ficar dias ou semanas parada.

Os equipamentos rodam 24 horas por dia ou possuem paradas nos finais de semana. Dependendo do processo industrial, eles podem entrar no algoritmo que foi baseado no estudo científico existente.

#### 4.5 APLICAÇÃO DO MODELO

A metodologia deste trabalho é para definição de uma política de monitoramento dos equipamentos, baseada em DT, para 1.700 equipamentos.

Antes do desenvolvimento de qualquer modelo de monitoramento, foi necessário identificar os métodos de surgimento de defeitos e falha dos equipamentos. Neste trabalho, primeiramente, buscou-se entender os tipos de defeitos que a manutenção preditiva é capaz de identificar com as frequências em cada componente de cada tipo de equipamento, assim como a política de inspeção dos equipamentos.

Assim, foi realizado o detalhamento de cada equipamento por meio de uma série de levantamentos de dados técnicos dos ativos, custos de manutenção, custo de falha, custo de inspeção, entre outros. Com esses dados, foi construída uma planilha, e listados todos os equipamentos em comum no mesmo processo operacional, porém, com linhas diferentes.

No primeiro levantamento, foram recolhidos dados de motores, redutores, compressores, mancais, sopradores, redutores de massa, redutores das linhas 6000, linha 4000, linha ninho, entre outros. Esses são equipamentos importantes para o processo de fabricação, em que, se o ativo entrar em falha por qualquer condição no processo produtivo, o processo é parado imediatamente.

O primeiro equipamento avaliado durante a pesquisa foram os motores das masseiras, pois eles são responsáveis pelas misturas dos ingredientes. Nesses motores, foi realizado o levantamento do histórico de defeitos durante o histórico de falha do equipamento como: rolamento, lubrificação, folga, desalinhamento, batimento de correia e parafuso folgado.

Por intermédio desses modos de falha, os números foram levantados em dias de todos os outros equipamentos que estão no mesmo processo, porém, cada modo de falha tem uma característica diferente no processo de degradação dos componentes internos. Por exemplo,

em um defeito de rolamentos, a probabilidade de quebra é muito maior do que quando ocorre uma falha estrutural ou, até mesmo, uma falha de lubrificação, em que a falha ocorre exponencialmente.

Como alguns equipamentos diferenciam seu modo de falha do outro, um exemplo a ser citado são os redutores, pois eles têm sistema de engrenagens, sendo que alguns contêm de três a quatro pares de engrenamento, e seus defeitos acontecem nas engrenagens.

Esse modelo foi aplicado em equipamentos com uma base histórica de nove anos de monitoramento. Antes desse modelo ser aplicado, foi feito o estudo por meio de um histórico de laudos de cada equipamento para projetar os tempos de falha. Também se obteve uma projeção de conhecimento *a priori* de especialistas em manutenção para o estudo dos modos de falha de uma equipe mais conservadora, em que a quebra de equipamento não possui uma taxa de falha grande, mediante o levantamento dos laudos de falhas dos equipamentos que entraram para o estudo.

Os itens citados possuem componentes semelhantes, como rolamentos, porém, sua taxa de falha é muito diferente em razão do processo de produção de cada máquina. Nos modelos, cada equipamento tem de cinco a sete possíveis falhas diferentes, como, por exemplo: falha no rolamento, desalinhamento, desbalanceamento, engrenagem, passagem de pás, lubrificação, ressonância, folgas, problema elétrico etc.

No processo de monitoramento, os espectros captados pela medição são capazes de, em apenas uma inspeção, analisar todos os modos de falha, por intermédio de um *software* que consegue identificar cada falha, utilizando a frequência característica de cada defeito. Quando um equipamento é inspecionado e surge um problema  $(0, T)$ , tem-se um *delay time* em que  $(h, h + dh)$ . A probabilidade desse evento é  $f(h)dh$ .

Para uma inspeção em que o monitoramento intensifica um problema  $(0, T - h)$ , o defeito é reparado; se não, haverá um reparo na inspeção. Por meio da fórmula Equação 14 referente ao  $b(T)$ , determina-se a probabilidade de um defeito surgir como uma falha catastrófica, com isso, calcula-se para três possíveis cenários: no modo crítico, no modo atenção e no modo conservador. Esses cenários tiveram como base os laudos de manutenção preditiva dos equipamentos. Por exemplo, a falha por deficiência na lubrificação no rolamento do motor tende a acontecer em questão de dias para esse rolamento entrar em falha catastrófica. Já em um problema estrutural, dependendo do equipamento, a falha pode demorar meses para acontecer.

O laudo de manutenção preditiva relata a defeito específico que o equipamento possui, como, por exemplo: lubrificação, desalinhamento, folga, rolamento, batimento de correia e

parafuso folgado. Ainda assim, foram entrevistados especialistas em cada equipamento para ajudar no tempo de falha dos equipamentos, tais como: redutores, bombas, motores, mancais e compressores.

Assim, conseguiu-se prever o tempo, em dias, em que o equipamento poderia entrar em falha, isso ocorrendo também com base no histórico de produtividade e eficiência da linha de produção. Nesse modelo, foi calculada a probabilidade de surgir um defeito dentro do processo de monitoramento na Equação 14 referente ao  $b(T)$ , em que  $T$  é o período de inspeção, e  $h$  é um dado do defeito que vai surgir no equipamento.

Na Tabela 4, foram estratificados todos os modos de falha do equipamento (motor da masseira) durante o período de nove anos de monitoramento com monitoramento mensal.

Tabela 4 – Equipamentos com os modos de falha e tempos

		TEMPO					
		Modo crítico em dias	Modo atenção em dias	Modo conservador em dias	(db)	d	k
Motor da masseira	Lubrificação	30	60	300	0,8	0	0,005479452
	Folga	15	90	120	0,8	0	0,002739726
	Desalinhamento	20	200	365	0,8	0	0,002739726
	Rolamento	5	30	45	1	0	0,000684932
	Batimento de correia	30	90	180	0	0	0,000684932
	Parafuso folgado	10	40	90	0,041	0	0,002739726

Fonte: O autor (2021).

Cada modo de falha representa um laudo de manutenção preditiva emitido para seu respectivo problema, ou seja, este equipamento já possuiu laudos com falha de lubrificação, folga, desalinhamento, rolamento, batimento de correia e parafuso folgado.

Os laudos de manutenção preditiva emitidos pelo departamento e analisados junto com os especialistas indicaram o grau da potencialidade de o equipamento vir a falhar, em modo crítico, atenção e conservador. Por exemplo, um problema na masseira referente a um laudo de falha de lubrificação emitido de forma padronizada baseado nos históricos de falha indicando a necessidade de entrar na programação de manutenção preventiva é de 30 dias para o modo crítico. Diversos modos de falha dos equipamentos foram analisados.

Após esse modelo, realizou-se o levantamento do tempo médio de reparo do (bd). Foi considerado o histórico de MTTR alocado no programa de gerenciamento da manutenção com cada laudo enviado. Uma falha de qualquer natureza mecânica no equipamento e, através desse levantamento de falhas/laudos de manutenção preditiva.

Na Tabela 5, a seguir, foram incluídos os custos de manutenção, inspeção e manutenção preventiva por meio dos laudos de manutenção preditiva.

Tabela 5 – Entrada dos custos

		Dados de entrada					
		Tempo (dias)			Custos		
		Modo crítico	Modo atenção	Modo conservador	Cb	Ci	I
Motor da masseira	Lubrificação	30	60	300	R\$ 10.000,00	R\$ 1.200,00	R\$ 18,97
	Folga	15	90	120	R\$ 10.000,00	R\$ 1.200,00	R\$ 18,97
	Desalinhamento	20	200	365	R\$ 7.500,00	R\$ 1.100,00	R\$ 18,97
	Rolamento	5	30	45	R\$ 10.000,00	R\$ 3.500,00	R\$ 18,97
	Batimento de correia	30	90	180	R\$ 3.200,00	R\$ 1.200,00	R\$ 18,97
	Parafuso folgado	10	40	90	R\$ 2.000,00	R\$ 1.200,00	R\$ 18,97

Fonte: Modelo *delay time* (2020).

Na Tabela 5, Cb é o custo de reparo após falha referente a uma projeção do custo de manutenção corretiva. Esses custos são com mão de obra em homem hora, custo com peças de reposição, aluguel de guincho, soldas em geral, e foram levantados no *software* de gerenciamento de manutenção o EBS da Oracle. Já Ci é o custo de reparo na inspeção referente a uma projeção ao custo de manutenção preventiva. O custo de reparo preventivo é bem mais baixo que o corretivo, porque o equipamento não sofre uma parada emergencial por falha, podendo programar sua intervenção com antecedência e dentro de uma parada programada na produção. E I é o custo de inspeção da manutenção preditiva. Nesta aplicação, foi considerado o custo de R\$ 18,97 por inspeção deste equipamento. Uma inspeção apenas consegue identificar todos esses modos de falha para cada tipo de equipamento.

Na Tabela 6, D(T) é tempo médio da indisponibilidade do sistema e calculado por uma unidade de tempo para ser incorrido operar uma política de inspeção de período T como mostra da Equação 15.

Tabela 6 – Downtime em horas/ano

		D(T) em horas por ano					
		10	20	30	40	50	60
Motor da masseira	Lubrificação	0,000000	0,000000	0,000000	0,0000045098	0,000029	0,000081
	Folga	0,000000	0,000001	0,000010	0,0000362398	0,000080	0,000141
	Desalinhamento	0,000000	0,000000	0,000000	0,0000023530	0,000006	0,000013
	Rolamento	0,000003	0,000039	0,000119	0,0002294998	0,000320	0,000381
	Batimento de correia	0,000000	0,000000	0,000000	0,0000000000	0,000000	0,000000
	Parafuso folgado	0,000000	0,000001	0,000004	0,0000105308	0,000019	0,000029

Fonte: Modelo *delay time* (2020).

Ainda dentro do conceito do *delay time*, tem-se o cálculo referente ao custo esperado para inspecionar o equipamento no período T, na Equação C(T). Esse custo de inspeção foi calculado para cada tipo de falha, Equação 16.

Com esses cálculos, foi possível identificar o melhor período para inspecionar o equipamento dentro de uma margem de segurança que se relacione ao custo de reparado e ao

custo após a falha, tendo em vista que o custo para inspecionar os equipamentos é fixo para cada equipamento.

Tabela 7 – Com levantamento de custo e o CT em reais por hora

		C(T) em R\$					
		10	20	30	40	50	60
Motor da masseira	Lubrificação	8,472342	7,523842	7,207676	7,099200607	7,272235	7,784457
	Folga	5,184671	4,242549	4,034812	4,160558581	4,54216	5,15374
	Desalinhamento	4,910699	3,962199	3,649169	3,506772268	3,443923	3,430258
	Rolamento	4,312812	3,59619	3,802522	4,363260601	4,854289	5,186794
	Batimento de correia	2,718918	1,770418	1,454252	1,297436793	1,209436	1,160916
	Parafuso folgado	5,184671	4,251392	4,001182	3,96740065	4,04698	4,173092

Fonte: Modelo *delay time* (2020).

A Tabela 7 mostra os custos médios, por período de inspeção de cada equipamento e cada modo de falha. Com esses dados, foi possível tomar algumas decisões em relação à periodicidade de inspeção, levando-a para um novo formato no modelo de contrato.

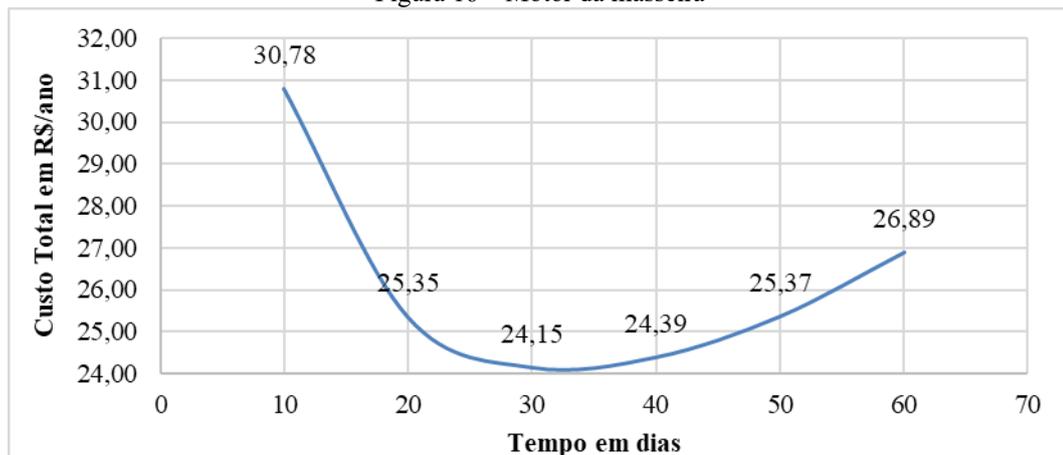
#### 4.6 ANÁLISE DE RESULTADOS DE DISCUSSÕES

Baseando-se nos resultados obtidos com conhecimento *a priori* da equipe envolvida, foi realizado o levantamento do tempo de cada modo de falha para todos os equipamentos no modo: crítico, atenção e conservador, como mostra a Tabela 4, com o cálculo do  $b(t)$ .

Com esses dados, foram levantados os custos de manutenção para cada modo de falha, conforme mencionado na Tabela 5. Através dos modos de falha dos equipamentos da planta, foi observado, mediante o custo total por inspeção  $C(T)$ , que os equipamentos podem sofrer mudança em sua periodicidade sem comprometer a qualidade de inspeção, melhorar o processo de análise aumentando o tempo de análise dos equipamentos e reduzir o custo do contrato ou ajustando o modelo de contrato.

Como mostra a Figura 16, a seguir, no motor da masseira, a melhor periodicidade para inspeção dos equipamentos com o menor custo é entre 30 e 40 dias, sem comprometer a qualidade, o que irá garantir a disponibilidade do equipamento.

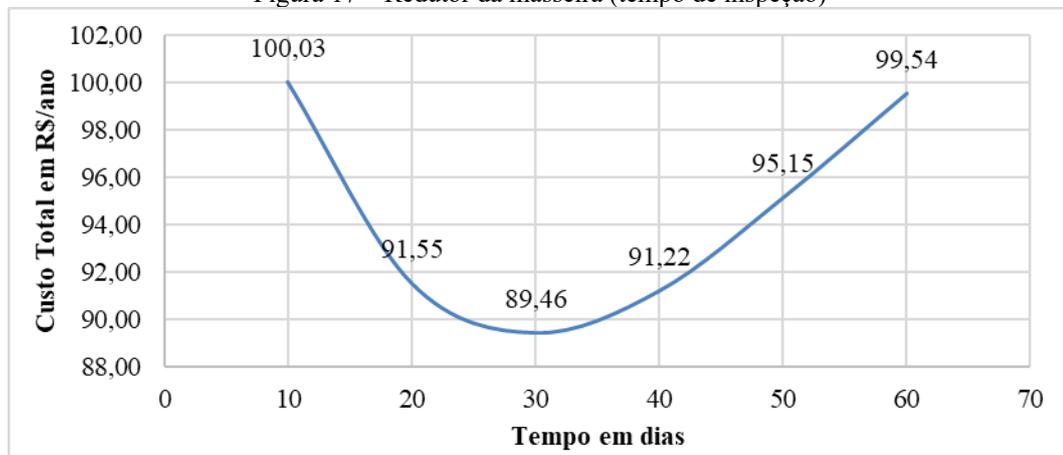
Figura 16 – Motor da masseira



Fonte: O autor (2021).

O redutor da masseira (Figura 17) que faz parte do conjunto, junto com seu motor principal da masseira, possui um sistema de engrenamento com 4 eixos de transmissão bem complexo, e sua manutenção é bem específica e onerosa. A falha deste equipamento pode sofrer grandes perdas na produção e o equipamento, analisando o gráfico a melhor periodicidade e a cada 30 dias de inspeção.

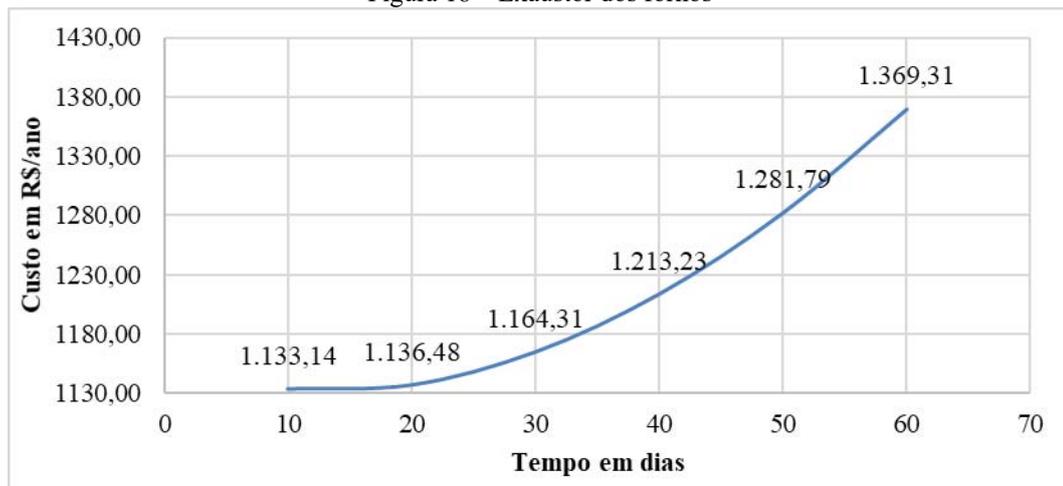
Figura 17 – Redutor da masseira (tempo de inspeção)



Fonte: O autor (2021).

Entre as análises do modelo, evidenciam-se os exaustores dos fornos, como mostra a Figura 18. Esses motores têm uma taxa de falha elevada e a criticidade dos exaustores elevada para o processo produtivo, sendo que seu custo de manutenção é baixo, porém, impacta bastante no processo produtivo se algum exaustor entrar em falha. No caso dos exaustores, para garantir a melhor *performance* e para melhorar a qualidade de inspeção, o intervalo recomendado ficou entre 10 e 20 dias.

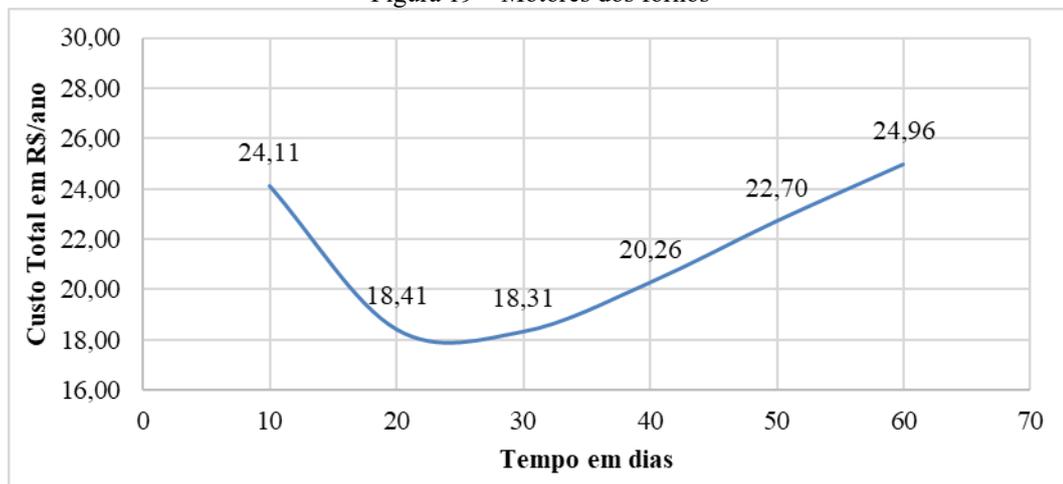
Figura 18 – Exaustor dos fornos



Fonte: O autor (2021).

Os motores dos fornos têm uma função de transmitir força para o transporte de esteiras metálicas de 10 a 20 metros dependendo da linha de produção. Esses dispositivos possui um problema em seu projeto, em que sua carcaça é de alumínio, sem ponto de lubrificação externo, local de instalação e muito quente, tornando-se agressivo para o equipamento. Diante dos custos e da taxa de falha deste equipamento, o modelo classificou uma periodicidade entre 20 a 30 dias, evidenciada na Figura 19.

Figura 19 – Motores dos fornos

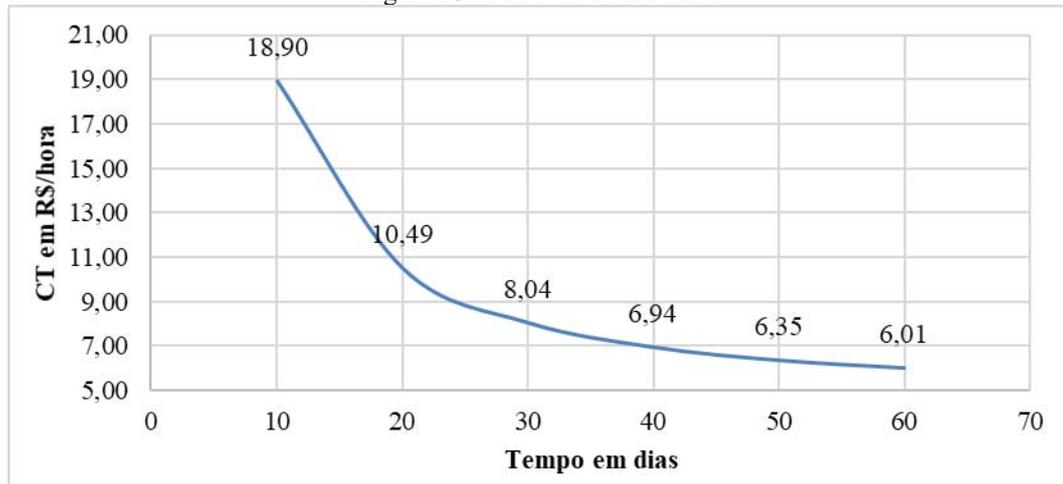


Fonte: O autor (2021).

O sistema de transmissão dessas esteiras possui um conjunto chamado motoredutor como acionamento principal. Esses motoredutores têm capacidade de torque e carga muito maior que a necessidade que é exigida pelos fornos. Com isso, a taxa de falha desses equipamentos é muito baixa, por ser de extrema confiabilidade, com base nos históricos de intervenções desses motoredutores que tiveram poucas intervenções no decorrer de nove anos.

Eles têm um plano de lubrificação e uma análise de óleo de acordo com o fabricante. Rodando o modelo proposto, o C(T) deste equipamento ficou acima de 60 dias, mostrado na Figura 20.

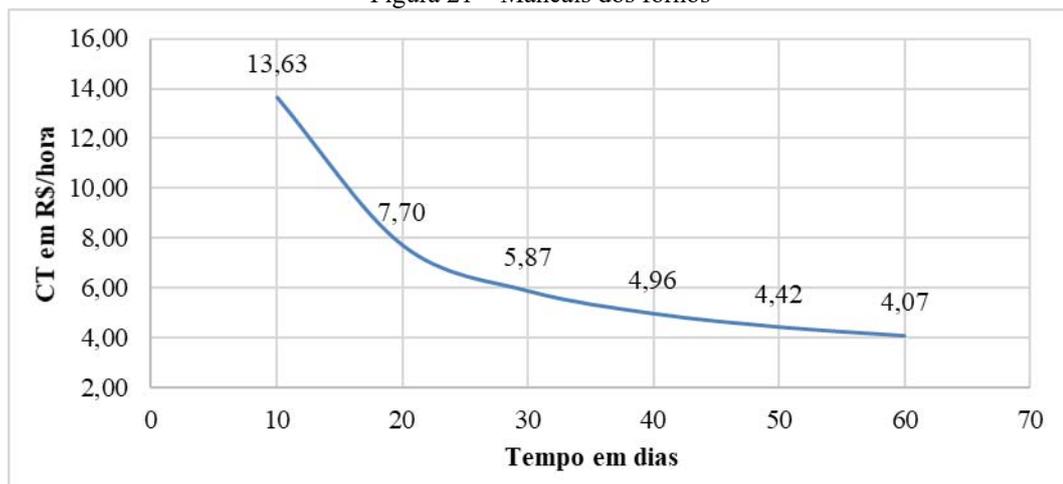
Figura 20 – Redutores dos fornos



Fonte: O autor (2021).

Os mancais dos fornos (Figura 21) são dispositivos de têm a função de sustentar a esteira nos rolos. A rotação dos mancais fica em torno de 30 a 50 rpm, dependendo do produto e da linha de produção. Esses mancais possuem lubrificação externa e um plano de lubrificação bem consolidado.

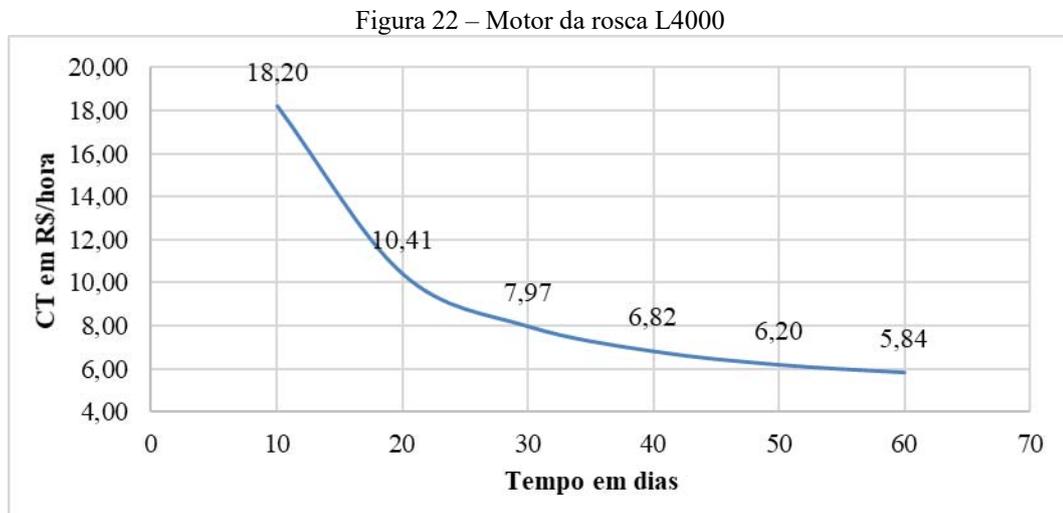
Figura 21 – Mancais dos fornos



Fonte: O autor (2021).

A manutenção dos mancais não é complexa em razão de sua forma construtiva e bipartida. A periodicidade desse equipamento antes do modelo é de 30 dias, porém, com o modelo rodando para equipamento, ficou acima de 60 dias, isso quer dizer que esse

equipamento poderá ter uma periodicidade bem maior que os 30 dias propostos no modelo antigo de periodicidade, como mostra a Figura 22.

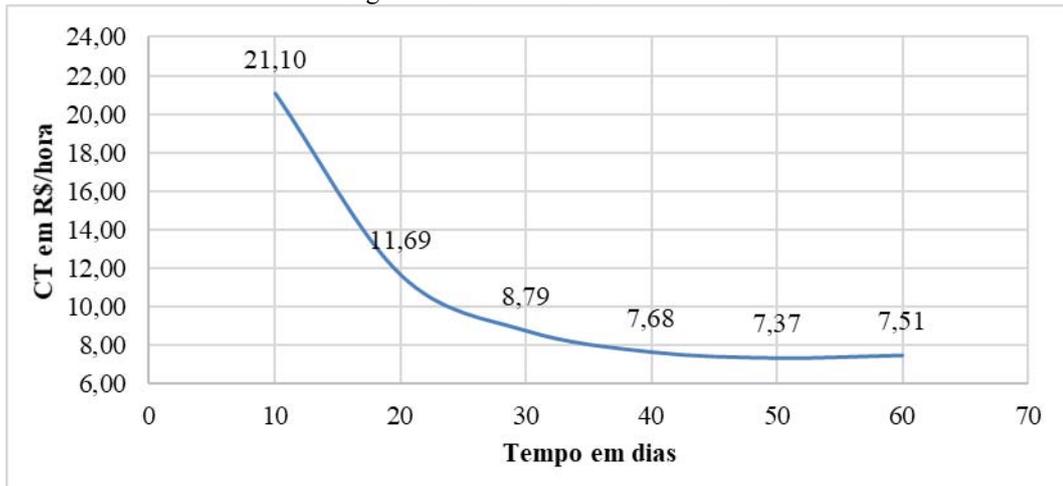


Fonte: O autor (2021).

O motor da rosca da linha 4000 é responsável pela fabricação de marcarão e tem capacidade 4 toneladas hora de produção. Sua função é transmitir potência para um redutor de 6 eixos, por isso o motor possui potência de 100 KW. Esses motores, cujo fabricante é WEG, possuem plano de lubrificação, pois os pinos graxeiros são externos e têm manutenções preventiva de maneira sistemática. Além disso, possuem manutenção complexa por serem pesados e de grande porte, e sua confiabilidade é extremamente elevada por ter partes robustas e grandes.

O redutor da rosca da linha 4000 (Figura 23) tem as mesmas características do motor, são equipamentos robusto com quatro eixos de transmissão de redução de força para uma transmitir força para uma extrusora de macarrão este equipamento e uma manutenção bem complexa se entrar em falha, porém, possui planos de manutenção como análise de óleo lubrificante se forma sistemática garantindo ainda mais a robustez do equipamento. Esse equipamento possui uma periodicidade de 30 dias para o intervalo de inspeção, mas, de acordo com o modelo proposto, poderá ser de 60 dias o intervalo de inspeção.

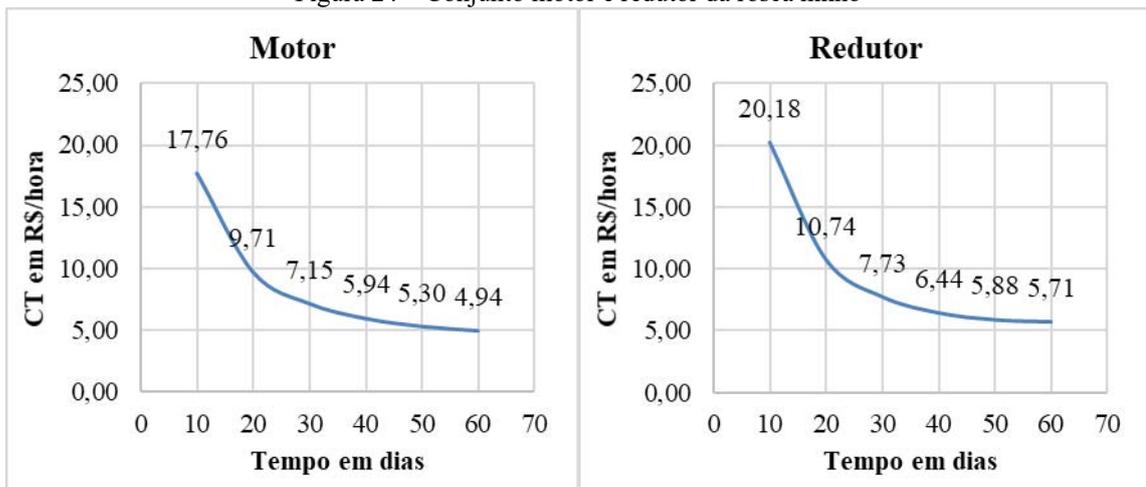
Figura 23 – Redutor da rosca L4000



Fonte: O autor (2021).

Nesses dois equipamentos, motor e redutor da rosca ninho (Figura 24), é possível analisá-los em conjunto por serem equipamentos integrados e do mesmo fabricante WEG.

Figura 24 – Conjunto motor e redutor da rosca ninho



Fonte: O autor (2021).

Com isso, esse conjunto tem plano de manutenção de forma sistemática, plano de lubrificação e análise de óleo do lubrificante. Além disso, sua taxa de falha é baixa, sua manutenção é mais simples que os redutores de linha 4000 e seu sobressalente possui nacionalização. No modelo aplicado nesses dois equipamentos, a periodicidade proposta ficou em 60 dias, e irá manter a mesma qualidade e confiabilidade deste equipamento.

## 5 CONCLUSÕES

Com a aplicação do modelo *delay time*, foi possível revisar todos os equipamentos monitoráveis referentes à periodicidade de inspeção dentro das rotas de manutenção preditiva e identificar o momento em tempo mais adequado para inspecionar os equipamentos dentro dos parâmetros que o modelo indicava.

A rota anteriormente tinha 1.700 equipamentos monitorados mensalmente, gerando um custo mensal de R\$ 32.249,00. Com a proposta para uma nova classificação de criticidade dos equipamentos, na qual seriam medidos mensalmente apenas 950 equipamentos rotativos, com custo mensal de R\$ 18.021,50, houve redução de 55% no custo acertado no contrato de manutenção preditiva vigente junto com o cliente.

Neste estudo, restou evidente que o valor cobrado por equipamento monitorado representava 0,001% do custo de manutenção de alguns equipamentos, podendo, no futuro, a empresa contratada de manutenção preditiva solicitar reajustes do valor do contrato com o objetivo de proporcionar uma condição mais favorável para ambas as partes.

O estudo mostrou que os contratos de manutenção preditiva têm oportunidades de melhorias com foco na qualidade do serviço de inspeção preditiva. Ainda existem empresas que têm a premissa de quanto mais medições ocorrerem dentro do mês, melhor será. Com a aplicação do modelo proposto neste estudo, a empresa prestadora de serviços de manutenção preditiva pode alavancar seu faturamento e, conseqüentemente, garantir maior confiabilidade nos laudos de manutenção preditiva dos equipamentos, gerando maior valor agregado dentro do contrato, menos desgaste nos técnicos de manutenção com falha nos laudos de manutenção preditiva. Mostrou-se também quais são os equipamentos realmente importantes para serem monitoráveis, em que o custo de uma falha destes equipamentos pode gerar grandes perdas financeiras e paralização no processo produtivo.

A aplicação do modelo proposto possibilitou recalcular a periodicidade de todos os equipamentos por meio do algoritmo criado e executado na empresa estudada. Além disso, é possível garantir melhor *performance* no processo de inspeção de manutenção preditiva, sem comprometer a qualidade do serviço prestado ou gerar falhas nos equipamentos.

### 5.1 LIMITAÇÕES

Um dos limitadores nesta pesquisa é que não existe processo de manutenção perfeito, bem como procedimentos implantados nas empresas de coleta de dados de preditiva. Muitos

processos industriais apresentam variação na carga, pressão e vazão dos equipamentos, fazendo com que muitas variáveis transformem o processo de análise de vibração difícil, e estruturar elas dentro do modelo é um desafio grande.

Mediante isso, vê-se que este estudo de caso poderá ser implementado e melhorado em outras empresas que tenham sua rotina a manutenção preditiva, gerando ganhos para a mesma.

Outro proveito a ser tirado deste trabalho é que este estudo poderá servir como base em estudo de periodicidade de rotas de inspeção de quaisquer tipos de equipamentos, sistemas e dispositivos industriais.

## 5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pode ser aplicado em diversas áreas, como na criação de rotas de inspeção para a indústria de energia elétrica, na mineração, em serviços e na saúde. Com ele, pode ser criado um sistema automatizado em formato de aplicativo que rode automaticamente o processo, apenas inserindo os dados de falha no sistema, podendo o programa rodar sozinho e ajudar no processo de decisão.

A aplicação deste estudo em indústrias de outro segmento seria relevante, visto que seria possível analisar se este processo de inspeção com o modelo de *delay time* sofreu alguma alteração no método criado nesta dissertação.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, G.; BANDEIRA, G.; GIANELLI, R. **Vibração e ruído em manutenção preditiva** [trabalho universitário]. Bauru: 2010.
- ADOGHE, A. U.; AWOSOPE, C. O. A.; EKEH, J. C. Asset maintenance planning in electric power distribution network using statistical analysis of outage data. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 47, p. 424-435, 2013.
- ANDRAWUS, J. A. *et al.* Optimisation of wind turbine inspection intervals. **Wind Engineering**, 32.5, p. 477-490, 2008.
- ASCHER, H.; FEINGOLD, H. **Repairable systems reliability**. New York: Marcel Dekker, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14224**: indústrias de petróleo e gás natural – coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção de equipamentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- BAGLEE, D.; JANTUREN, E. Can equipment failure modes support the use of a condition based maintenance strategy? **Procedia CIRP**, 87-91, 2014.
- BAKER, R.; WANG, W. Developing and testing the delay time model. **Journal of Operational Research Society**, v. 44, n. 4, p. 361-374, 1993.
- BARROS FILHO, A. Utilização de ferramentas de confiabilidade em um ambiente de manufatura de classe mundial. 2003.
- BERRADE, M. D.; CAVALCANTE, C. A. V.; SCARF, P. A. Maintenance scheduling of a protection system subject to imperfect inspection and replacement. **European Journal of Operational Research**, 218.3, p. 716-725, 2012.
- BERTSCHE, B. **Reliability in automotive and mechanical engineering**: determination of component and system reliability. Berlin: Springer, 2008.
- BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 70, n. 1, p. 71-83, 2000. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00047-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00047-8).
- BORGES, M. C. *et al.* **Implantação de sistema informatizado para planejamento e controle da manutenção** – Empresa Vileflex. 2009. 91 f. Curso Superior de Tecnologia – Manutenção Industrial – Universidade Vale do Rio Doce, Governador Valadares, 2009.
- BRIOSCHI, M. L. **Metodologia de normalização de análise do campo de temperaturas em imagem infravermelha humana**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

CASALI, C. **Estudo para a implantação da manutenção preditiva na empresa Paquetá Calçados Ltda e seus possíveis ganhos**. 2011. 23 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2011.

CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. Modelo multicritério de apoio a decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando PROMETHEE II em situações de incerteza. **Pesquisa Operacional**, 25.2, p. 279-296, 2005.

CHA, J. H.; FINKELSTEIN, M.; LEVITIN, G. On preventive maintenance of systems with lifetimes dependent on a random shock process. **Reliab Eng Syst Safe**, v. 168, p. 90-97, 2017.

CHRISTER, A. H. Delay-time model of reliability of equipment subject to inspection monitoring. **J Oper Res Soc.**, v. 38, n. 4, p. 329-334, 1987.

CHRISTER, A. H. Developments in delay time analysis for modelling plant maintenance. 1976.

CHRISTER, A. H.; WALLER, W. M. Reducing production downtime using delay-time analysis. **Journal of Operational Research Society**, p. 499-512, 1984.

FILHO, R. A. **Introdução à manutenção centrada na confiabilidade – MCC**. Programa de Atualização Técnica 2008 – Sistema FIRJAN – SESI/SENAI – Rio de Janeiro [*On line*]. Disponível em: <http://manutencao.net/v2/uploads/article/file/Artigo24AGO2008.pdf>. Acesso em: 11 out. 2011.

FOGLIATO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011.

GARCIA, M.; SANZ-BOBI, M.; PICO, J. SIMAP: Intelligent System for Predictive Maintenance: Application to the health condition monitoring of a windturbine gearbox. **Computers in Industry**, v. 57, n. 6, p. 52-568, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2006.02.011>.

GARG, A.; DESHMUKH, S. Maintenance management: literature review and directions. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 12, n. 3, p. 205-238, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552510610685075> 2006.

GONCHARENKO, A. A multi-optional hybrid functions entropy as a tool for transportation means repair optimal periodicity determination. **Aviation**, v. 22, n. 2, p. 60-66, 2018.

HASBULLAH, N.; AHMAD, R. **WITHDRAWN**: Failure analysis of tyre production process using FMECA method. 2015.

HAWKING, S. Mesmo que a vida pareça difícil, há... **Pensador**, Matosinhos, 2 nov. 2013. Disponível em: <https://www.pensador.com/frase/MTQzMDc1OA/>. Acesso em: 22 jan. 2021.

JARDINE, A. K.; LIN, D.; BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, n. 7, p. 1483-1510, 2006.

JESUS, S. M. G. **Leanness e manutenção produtiva total (TPM): modelo de produtividade e competitividade: estudo de caso**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2012. Disponível em: <http://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/2029/1/Dissertação%20.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2013.

KARDEC, A.; NASCIF, J. A. **Manutenção: função estratégica**. 4. ed. São Paulo: Qualitymark, 2013.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2010.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2012.

LAFRAIA, J. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras, 2014.

LOPES, K. B. R. C.; PAIS, L. S. **Modelo de avaliação multicritério para priorização em manutenção com base em indicadores de desempenho de uma indústria automotiva**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

LUCATELLI, M. **Proposta de aplicação da manutenção centrada em confiabilidade em equipamentos médico-hospitalares**. São Paulo: Qualitymark, 2002.

MACCHI, M. *et al.* **Maintenance management of railway infrastructures based on reliability analysis**. 2006.

MAIA, S. L. E. **Modelo de definição de políticas de inspeções em indústria de massas e biscoito**, INSID, Rio Grande do Norte 2019.

MARQUES, G. R. **Manutenção centrada em confiabilidade: estudo de caso da eficácia dos equipamentos industriais**. 2017.

MOUBRAY, J. **Manutenção centrada em confiabilidade – Reliability Centered Maintenance (RCM)**. Editora Aladon, Lutterworth – Inglaterra, Edição Brasileira, 2000.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance**. Industrial Press, 2001.

- NEPOMUCENO, L. **Manutenção preditiva em instalações industriais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1985.
- NIQUELE, J. Avaliação do desempenho da gestão de ativos após a suspensão do programa de manutenção autônoma em uma indústria de cartões de PVC. 2012.
- PEREIRA, M. J. **Técnicas avançadas de manutenção**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2010.
- PINTO, A. K.; XAVIER, J. N. **Manutenção: função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.
- PINTO, L. H. T. **Análise de falhas: tópicos de engenharia da confiabilidade**. Disponível em <http://www.mantenimentomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/failure.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2011.
- PRADO, C. C. A. **A busca da melhoria da qualidade nos serviços de manutenção**. Disponível em: [http://www.tecem.com.br/site/arquivos.asp?codigo=7&tipo=1&cat=1&arq=artigos/A\\_Busca\\_na\\_Melhoria\\_da\\_Qualidade\\_nos\\_Servicos\\_de\\_Manutencao.pdf](http://www.tecem.com.br/site/arquivos.asp?codigo=7&tipo=1&cat=1&arq=artigos/A_Busca_na_Melhoria_da_Qualidade_nos_Servicos_de_Manutencao.pdf). Acesso em: 30 maio 2010.
- RAMOS, E. F. A gestão de riscos usando FMEA. **Revista Mundo PM**, Rio de Janeiro, n. 10, 2006.
- ROSA, N. R. Aplicação da manutenção centrada em confiabilidade em um processo da indústria automobilística, dissertação mestrado, Rio Grande do Sul 2016.
- SCARF, P. A.; CAVALCANTE, C. A. V.; LOPES, R. S. Delay-time modelling of a critical system subject to random inspections. **European Journal of Operational Research**, 278.3, p. 772-782, 2019.
- SILVA, R. P. **Gerenciamento do setor de manutenção**. Departamento de Economia, Contabilidade e Administração da Universidade de Taubaté. Taubaté – SP. 2004. 92p.
- SIQUEIRA, I. P. **Manutenção centrada em confiabilidade: manual de implementação**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2012.
- SMITH, M. T. **History of the FMEA**. 2014. Disponível em: <http://elsmar.com/FMEA/sld011.htm>. Acesso em: 22 jan. 2021.
- SOBRAL, J.; ABREU, A. Manutenção produtiva total. *In: Manutenção produtiva total e gestão Lean*. Qualitymark, 2013.
- SOUZA, V. C. **Organização e gerência da manutenção: planejamento, programação e controle da manutenção**. 3. ed. São Paulo: All Print, 2009.
- TACQUES, R. *et al.* Vibração de Turbomáquinas: o System 1 na visão de usuário. **Revista Abendi**, São Paulo, v. 6, n. 31, p. 22-29, 2009.

TATSCH, D. **Metodologia da manutenção centrada na confiabilidade aplicada em uma máquina de montar pneus**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

TENÓRIO. *Flexibilização organizacional, mito ou realidade?* Rio de Janeiro: Editora FGV, 2009.

THURNES, C. *et al.* **World Conference: using TRIZ to invent failures – concept and application to go beyond traditional FMEA – 2015**.

VERRI, L. A. **Gerenciamento pela qualidade total na manutenção industrial: aplicação prática**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2007.

VIANA, H. R. G. **PCM, Planejamento e Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014.

WANG, W. An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modelling. **Reliability Engineering and System Safety**, p. 165-178, 2012.

WANG, W.; BANJEVIC, D. Ergodicity of forward times of the renewal process in a block-based inspection model using the delay time concept. **Reliability Engineering and System Safety**, p. 1-7, 2008.

WYREBSK, J. **Manutenção produtiva total: um modelo adaptado**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

XENOS, H. G. d’P. **Gerenciando a manutenção produtiva: o caminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade**. Nova Lima: Falconi, 2004.

YA’CUBSOHN, R. *El diagnostico de fallas por análisis vibratorio*. São Paulo: Die Techik, 1983.

ZAIONS, D. R. **Consolidação da metodologia de manutenção centrada em confiabilidade em uma planta de celulose e papel**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

ZHAO, F. E. I.; LIU, X.; PENG, R. Inspection-based policy considering human errors for three-stage delay time degradation systems. **Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)**, 23.5, p. 702-706, 2018.