

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Aeroespacial

Implementação de manutenção baseada na condição em máquina de conformação de latas de bebidas.

**Autora: Maria Eduarda Borges Galvão
Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa**

**Brasília, DF
2022**



Maria Eduarda Borges Galvão

Implementação de manutenção baseada na condição em máquina de conformação de latas de bebidas.

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF

2022

Maria Eduarda Borges Galvão

Implementação de manutenção baseada na condição em máquina de conformação de latas de bebidas. / Maria Eduarda Borges Galvão. – Brasília, DF, 2022-113 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. . 2. . I. Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Implementação de manutenção baseada na condição em máquina de conformação de latas de bebidas.

CDU

Maria Eduarda Borges Galvão

Implementação de manutenção baseada na condição em máquina de conformação de latas de bebidas.

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, :

Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa
Orientador

Prof. Dr. Cristian Vendittozzi
Convidado 1

Prof. Dr. Henrique Gomes de Moura
Convidado 2

Brasília, DF
2022

Agradecimentos

Agradeço à minha mãe, Leide, que acredita e investe em mim e na minha carreira diariamente. Não há palavras para descrever a gratidão por toda a força recebida por ela. Obrigada também às minhas irmãs, Paula e Renata, por não só me apoiar durante esse estudo, mas também em todas as etapas da minha vida.

Agradeço ao meu parceiro de vida, Luiz Guilherme, por além de me dar suporte para finalizar meus estudos, me deu outra família. Agradeço à minha cunhada, Norma, por todos os conselhos e correções, e por me fazer também sua irmã.

Obrigada a todos os amigos e familiares que se disponibilizaram a me ajudar durante meu trabalho, especialmente, Bernardo Larcercda, Jamyli Lopes e Júlia Pessoa. Aos meus amigos e colegas de trabalho, que fizeram esse estudo possível, Carlos Silva, Raifran Junior, Nathan Brancalião, João Paulino e Rone César.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa, que tanto me ensinou, com paciência e discernimento. Agradeço aos professores da banca, Prof. Dr. Cristian Vendittozzi e Prof. Dr. Henrique Gomes de Moura pelos conselhos para melhorar meu trabalho e a disponibilidade para me ajudar sempre que necessário.

Resumo

Uma das principais estratégias utilizadas para aumentar a capacidade produtiva de uma indústria é ampliar a disponibilidade de produção e, conseqüentemente, reduzir o tempo de parada da linha devido a falhas funcionais dos equipamentos operantes. Assim, a definição da estratégia de manutenção dos ativos da linha de produção é de extrema relevância para garantir o aumento da capacidade produtiva. O objetivo do presente trabalho é avaliar a viabilidade técnica de implementação de um sistema de manutenção preditiva *online*, que coleta dados de vibração e temperatura de equipamentos em tempo real, na linha de produção de uma empresa fabricante de latas de alumínio. Para alcançar o objetivo determinado, foi realizado um estudo de caso do redutor de um dos equipamentos mais críticos da linha de produção, o *Necker CMB*. Por meio do histórico de dados de falha e utilizando-se da teoria estatística da manutenção centrada em confiabilidade, foram estimados os principais indicadores de confiabilidade do componente, e por meio deste, desenvolvido um plano de manutenção preventiva para o objeto de estudo. Além disso, a aplicação da ferramenta de Análise dos Modos e Efeitos de Falha (FMEA) foi realizada, sendo possível determinar os principais modos de falha com seus respectivos riscos e, promover ações de melhoria para redução desses riscos de incidência. A análise do novo sistema preditivo *online* foi realizada de acordo com a sua coleta de dados, que indicavam a facilidade de detecção de falhas e o rápido diagnóstico das causas das falhas. Ao comparar o tempo de detecção do sistema preditivo *online* com o do atual sistema utilizado pela empresa, conclui-se que a preditiva online permite a detecção mais assertiva e facilitada das ocorrências de falha do ativo. Ainda por meio da análise dos dados coletados em tempo real foi possível identificar diversas vantagens desse sistema para a área de manutenção, como a facilidade na detecção de defeitos, o aproveitamento do máximo de tempo de vida útil dos componentes, o acompanhamento das tendências de vibração, entre outros. Pelo fato da empresa analisada ter como principal requisito a redução das paradas de linha não programadas, e pela preditiva *online* se tratar de um sistema que não possui alto custo de aquisição, é possível concluir que a implementação do sistema preditivo de monitoramento, na linha de produção da empresa fabricante de latas de alumínio, é considerada viável tecnicamente e economicamente.

Palavras-chaves: Manutenção. Confiabilidade. Indústria 4.0. Falha. Preditiva.

Abstract

A key strategy employed to increase the productive capacity of an industry is to increase production availability and, consequently, reduce line downtime due to functional failures of operating equipment. Thus, defining the maintenance strategy for the production line assets is extremely important to guarantee the increase in production capacity. The goal of this paper is to evaluate the technical feasibility of implementing a predictive maintenance system online, which collects vibration and temperature data from equipment in real time, in the production line of a company that manufactures aluminum cans. To achieve the stated objective, a case study was conducted on the gearbox of one of the most critical pieces of equipment in the production line, the Necker CMB. Through the failure data history and using the statistical theory of Reliability Centred Maintenance, the main reliability indicators of the component were estimated, and through this, a preventive maintenance plan was developed for the object of study. In addition, the application of the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) tool was performed, being possible to determine the main failure modes with their respective risks and to promote improvement actions to reduce these incidence risks. The analysis of the new predictive system online was performed according to its data collection, which indicated the ease of fault detection and the rapid diagnosis of the causes of failure. When comparing the time of detection of the online predictive system with the current system used by the company, it is concluded that the online predictive allows a more assertive and facilitated detection of the occurrences of asset failure. Also by analyzing the data collected in real time it was possible to identify several advantages that this system offers to the maintenance area, such as the ease in detecting defects, the maximum use of the components' useful life, the monitoring of vibration trends, among others. Due to the fact that the analyzed company has as its main requirement the reduction of unscheduled production shutdowns, and due to the predictive online is a system that does not have a high acquisition cost, it is possible to conclude that the implementation of the predictive monitoring system in the production line of the aluminum can manufacturer is considered technically and economically feasible.

Key-words: *Maintenance. Reliability. Industry 4.0. Failure. Predictive.*

Lista de ilustrações

Figura 1 – Custo típico de instalação e operação de sistema de controle preditivo. Fonte: Adaptação de Mobley (2002)	24
Figura 2 – Severidade de vibração em máquinas rotativas de acordo com a norma ABNT NBR 10082. Fonte: Adaptado de ABNT NBR 10082 (2011). . .	29
Figura 3 – Severidade de vibração segundo a norma ISO 10816. Fonte: Adaptado de ISO 10816 (2013)	30
Figura 4 – Exemplo de análise de termografia de painéis elétricos utilizando câmara termográfica. Fonte: IFELL (2021).	31
Figura 5 – Histograma de variáveis aleatórias. Fonte: Dodson e Schwab (2006) . .	32
Figura 6 – Exemplo densidade de probabilidade. Fonte: Dodson e Schwab (2006) .	33
Figura 7 – Padrões de Falha. Fonte: Viana (2002)	43
Figura 8 – Estudo da <i>United Airlines</i> da distribuição dos padrões de falha. Fonte: Viana (2002)	43
Figura 9 – A curva P-F. Fonte: Moubray (1997)	44
Figura 10 – Produto antes e depois do processo de formação do pescoço. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	56
Figura 11 – Padrões de produto produzidos pela fabricante. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	57
Figura 12 – Representação da localização dos pistões de base e de ferramenta. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	58
Figura 13 – Ferramentas de conformação do pescoço, <i>Necking Die</i> e Bloco guia. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	59
Figura 14 – Processo de conformação do pescoço da lata. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	59
Figura 15 – Layout de montagem e operação do equipamento. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	60
Figura 16 – Processo de conformação do flange da lata. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	61
Figura 17 – Processo de reconformação do fundo da lata. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	62
Figura 18 – Evolução da velocidade média do equipamento entre o período de 2017 e 2021. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	63
Figura 19 – Evolução da disponibilidade do equipamento entre o período de 2017 e 2021. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	63
Figura 20 – Indicador de manutenção: Preventivas x Corretivas. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	64

Figura 21 – Funcionamento geral do novo sistema de monitoramento. Fonte: Adaptado de IFM (2021).	66
Figura 22 – Relatório de análise técnica fornecido pela fabricante, falha no eixo pinhão e pinhão do redutor. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	69
Figura 23 – Instalação dos sensores do novo sistema de monitoramento. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	70
Figura 24 – Interface do Software VES004 exibindo os dados de vibração da Estação de Conformação. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	71
Figura 25 – Exemplo da estimativa do RUL utilizando a <i>Predictive Maintenance Toolbox</i> . Fonte: Adaptado de MathWorks (2018).	72
Figura 26 – Histograma dados de falha. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	74
Figura 27 – Distribuições analisadas no estudo de caso. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	75
Figura 28 – Análise das distribuições aplicadas ao histograma da amostra. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	75
Figura 29 – Função confiabilidade, função de risco, função acumulada de falha para a distribuição de Weibull. Fonte: Autora.	77
Figura 30 – FMEA simplificado do redutor de acionamento do equipamento Necker CMB. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	79
Figura 31 – Controle dos modos de falha atual e sugerido. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	81
Figura 32 – Plano de ação para a implementação das ações sugeridas no FMEA. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	83
Figura 33 – Plano de inspeção e manutenção sugerido para o redutor de acionamento. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	86
Figura 34 – Velocidade global de operação do redutor de acionamento 3. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	88
Figura 35 – Representação da ocorrência da falha no redutor. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	89
Figura 36 – Início, detecção e eliminação da falha no redutor. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	90
Figura 37 – Velocidade global de operação do redutor de acionamento 5. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	91
Figura 38 – Relatório de detalhamento da ocorrência da falha. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	91
Figura 39 – Período de ocorrência de falha de lubrificação. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	92

Figura 40 – Temperatura de operação do equipamento na ocorrência da falha. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	93
Figura 41 – Relatório de manutenção realizado pela empresa terceirizada. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	94
Figura 42 – Evidência dos defeitos nos componente rotatórios do redutor. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	94
Figura 43 – Diagnóstico das causas da falha. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	96
Figura 44 – Velocidade global do redutor de acionamento 5. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	97
Figura 45 – Vantagens e desvantagens da implementação dos sistemas preditivos online e offline. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	99
Figura 46 – Viabilidade econômica de implementação da preditiva onlin Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	101

Lista de tabelas

Tabela 1 – Normas Nacionais relacionadas à Vibração Mecânica. Fonte: Adaptado de Ferreira (2012).	26
Tabela 2 – Normas Internacionais relacionadas à Vibração Mecânica. Fonte: Adaptado de Ferreira (2012).	27
Tabela 3 – Normas Nacionais e Internacionais relacionadas às análises de Termografia. Fonte: Autora.	32
Tabela 4 – Função densidade de probabilidade, função confiabilidade e função de risco para as distribuições estudadas. Fonte: Fogliatto (2011).	37
Tabela 5 – Determinação do indicador MTTF para as distribuições estudadas. Fonte: Fogliatto (2011).	37
Tabela 6 – Tabela de referência para a avaliação da Severidade do efeito da falha. Fonte: Adaptado de Fogliatto (2011).	53
Tabela 7 – Tabela de referência para a avaliação da Ocorrência do efeito da falha. Fonte: Fogliatto (2011).	54
Tabela 8 – Tabela de referência para a avaliação da detecção do efeito da falha. Fonte: Fogliatto (2011).	55
Tabela 9 – Definição dos pontos que serão monitorados no novo sistema de monitoramento. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.) . . .	67
Tabela 10 – Relação de acionamento dos conjuntos Motores/Redutores. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	68
Tabela 11 – Histórico de substituição do redutor de acionamento. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	69
Tabela 12 – Amostra do tempo de falha do redutor de acionamento 5. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	73
Tabela 13 – MTTF e níveis de significância das diferentes distribuições. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	76
Tabela 14 – Indicadores de manutenção obtidos por meio dos dados da amostra. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	78
Tabela 15 – Confiabilidade da periodicidade dos planos de inspeção e manutenção do redutor. Fonte: Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)	85

Lista de abreviaturas e siglas

MTTF	- Tempo até a falha(<i>Mean Time To Failure</i>).
MTTR	- Tempo médio de reparo(<i>Mean Time To Repair</i>).
ISO	- Organização Internacional de Normalização(<i>International Organization for Standardization</i>).
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas.
CPS	- Sistemas Ciberfísicos(<i>Cyber Physical Systems</i>).
IoT	- Internet das coisas(<i>Internet of Things</i>).
IIoT	- Internet industrial das coisas (<i>Industrial Internet of Things</i>).
MTBF	- Tempo médio entre falhas(<i>Mean Time Between Failure</i>).
FMEA	- Análise de modos e efeitos de falha(<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>).
LA	- Lado do acionamento.
LOA	- Lado oposto ao acionamento.
RUL	- Tempo de vida útil restante(<i>Remaining Useful Life</i>).

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	17
1.2	Justificativa	18
1.3	Objetivos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
	Fundamentação Teórica	20
2.1	Conceitos de Confiabilidade	20
2.1.1	Confiabilidade	20
2.1.2	Disponibilidade	20
2.1.3	Mantenabilidade	21
2.2	Tipos de Manutenção	21
2.2.1	Manutenção Corretiva ou Reativa	21
2.2.2	Manutenção Preventiva	22
2.2.3	Manutenção Preditiva	23
2.2.3.1	Análises preditivas de Vibrações Mecânicas	24
2.2.3.2	Análises preditivas de Termografia	30
2.3	Estatística da confiabilidade	32
2.3.1	Função densidade de probabilidade	32
2.3.1.1	Estimação dos parâmetros: Máxima verossimilhança	34
2.3.2	Medidas da confiabilidade	34
2.3.2.1	Função de confiabilidade $R(t)$	35
2.3.2.2	Função de risco $h(t)$	35
2.3.3	Distribuições de probabilidade em confiabilidade	36
2.3.3.1	Ajuste de dados e teste de aderência	37
2.4	Manutenção Centrada em Confiabilidade	38
2.4.1	Funções e padrões de desempenho	39
2.4.2	Falhas e modos de falha	39
2.4.3	Efeitos de Falha	40
2.4.4	Consequências da Falha	40
2.4.5	Tarefas pró-ativas e reativas	41
2.4.6	Padrão de falha	42
2.4.6.1	Curva de Falha Potencial	43
2.5	Indústria 4.0	44
2.5.1	Sistemas Ciberfísicos	45

2.5.2	Internet das Coisas	46
2.5.3	Big Data	46
2.5.4	Computação na Nuvem	47
2.5.5	Aprendizado de Máquina	47
3	METODOLOGIA	49
3.1	Medidas de confiabilidade	49
3.1.1	Tempo médio até a falha - MTTF	49
3.1.2	Tempo médio entre falha - MTBF	49
3.1.3	Tempo médio de reparo - MTTR	50
3.1.4	Método estatístico: A distribuição de Weibull	50
3.2	Ferramenta da manutenção para aumento da confiabilidade	51
3.2.1	Análise de Modos e Efeitos de Falha	51
3.2.1.1	FMEA de Processo	52
3.3	Equipamento Necker CMB3400	56
3.3.1	Funcionamento geral do equipamento	56
3.3.1.1	Estação de conformação do pescoço	56
3.3.1.2	Estação de flangeamento	60
3.3.1.3	Reconformação do fundo da lata	61
3.3.2	Atual estratégia de manutenção do equipamento	62
3.3.3	Implementação da Preditiva <i>On-line</i>	65
3.3.3.1	Pontos definidos para a medição	66
3.3.4	Objeto de estudo: Redutor de acionamento	68
3.4	Ferramentas computacionais	70
3.4.1	Ferramenta de manutenção preditiva do <i>Matlab</i>	71
4	RESULTADOS	73
4.1	Estatística Manutenção centrada em confiabilidade	73
4.1.1	Determinação da distribuição	73
4.1.2	Indicadores de Manutenção - Distribuição de Weibull	76
4.2	Desenvolvimento do FMEA	78
4.3	Definição da estratégia de manutenção - Manutenção centrada em confiabilidade	84
4.4	Sistema Preditivo Online	87
4.4.1	Detecção de falhas	88
4.4.2	Identificação das causas da falha	95
4.4.3	Estimativa tempo de vida útil restante- Redutor de acionamento 5	96
4.5	Viabilidade de implementação da Preditiva online	98
4.5.1	Viabilidade Técnica	98
4.5.2	Viabilidade Econômica	100

5	CONCLUSÕES	102
	REFERÊNCIAS	104
	ANEXOS	107
	ANEXO A – PRIMEIRO ANEXO	108
	ANEXO B – SEGUNDO ANEXO	111

1 Introdução

A manutenção industrial surge em meados do século XVI, período que marca a mudança na principal forma de organização da produção existente na sociedade: o abandono da produção artesanal e da manufatura pelo desenvolvimento da maquinofatura e da produção em grande escala. As revoluções industriais favoreceram o avanço tecnológico no meio industrial e, conseqüentemente, contribuíram para o aumento da capacidade produtiva e da necessidade de manutenibilidade dos equipamentos do processo produtivo. Entretanto, o setor responsável pela manutenibilidade industrial somente se firmou como necessidade indispensável no período da Segunda Guerra Mundial, através do grande avanço das técnicas de planejamento, controle e organização da manutenção para a tomada de decisão (VIANA, 2002).

O planejamento das estratégias de manutenção dos equipamentos é indispensável para a garantia de desempenho, disponibilidade e eficiência da linha de produção. As manutenções corretivas, preventivas e preditivas são as estratégias mais utilizadas e são divididas tradicionalmente de acordo com o objetivo de execução. A finalidade da corretiva compreende corrigir uma falha já existente no processo produtivo. Já a preventiva busca reduzir a probabilidade de falha ou de quebra através de planos de troca e manutenção dos componentes com intervalos de tempo definidos. Por fim, a preditiva procura determinar o momento no qual a quebra ou a falha ocorrerá por meio do sensoriamento do maquinário. A execução da manutenção preditiva permite observar as modificações e tendências dos parâmetros de desempenho do equipamento e, assim, determinar o momento ideal para execução da manutenção (ABNT NBR 5462, 1994; BALDISSARELLI; FABRO, 2019) .

Conforme Ollila e Malmipuro (2019), uma execução inadequada da manutenção tende a desencadear a deterioração do sistema de produção e a falta de qualidade do produto final, o que pode resultar em perdas financeiras significativas, atrasos, reclamações de clientes e produtos com qualidade insatisfatória. Ainda, conforme Widodo e Yang (2011), o custo de manutenção representa de 15 a 40% dos custos da planta de produção e dos custos operacionais totais de fabricação. Portanto, a manutenção adequada dos equipamentos impacta diretamente nos custos de produção e no tempo de inatividade, o que para Aboelmaged (2014) está relacionado com a capacidade das companhias de serem competitivas em relação a seu custo, desempenho e qualidade de produção.

De acordo com Viana (2002), a chegada da economia globalizada gerou forte influência no aumento da demanda por produtos com qualidade assegurada e custo competitivo. A concorrência para dominar o mercado consumidor entre os fabricantes de bens e serviços se tornou mais evidente, devido ao crescente volume de produção exi-

gido. Portanto, a busca pela maior disponibilidade de maquinário, a redução de falhas, a qualidade assegurada do produto e a constância no processo produtivo tornaram-se os principais objetivos das grandes organizações atuais. Para que seja possível alcançar estes objetivos, a manutenção deve desempenhar um papel estratégico e indispensável na empresa (BALDISSARELLI; FABRO, 2019).

Atualmente, o setor industrial vem sendo marcado pelos avanços tecnológicos referentes à automação industrial e ao paradigma da indústria 4.0. Conforme Nikolic et al. (2017), as ferramentas da indústria 4.0 se inserem cada vez mais na cadeia de produção, pois alcançar a autoconsciência, a automanutenção e aumentar a eficiência da produção industrial são os principais objetivos dessas ferramentas. Os autores Lasi et al. (2014) afirmam que, para prever o comportamento da produção e buscar as soluções dos futuros problemas detectados, as máquinas e o processo devem se integrar a uma rede que se comunique e analise os dados de interesse coletados. A integração das máquinas ao processo e às tecnologias presentes no contexto da indústria 4.0 permite monitorar os equipamentos através de uma grande coleta e tratamento de dados que auxiliam o processo de tomada de decisão. A análise em tempo real da linha de produção corrobora um processo de fabricação mais confiável e flexível (WANG et al., 2015).

A estratégia de manutenção considerada mais adequada e que fornece maiores benefícios ao setor industrial atualmente é a chamada Manutenção 4.0, que representa a manutenção preditiva utilizando elementos da indústria 4.0. Esta estratégia apresenta benefícios no sentido de otimização de peças, redução de custos, segurança da fábrica, aumento na vida útil dos equipamentos e qualidade assegurada do produto. As dificuldades na implementação da Manutenção 4.0 são referentes ao processamento de grandes repositórios de dados e do desenvolvimento de um sistema de tratamento e análise desses dados coletados. Esse sistema deve fornecer a condição de máquina em um curto período de tempo. Ainda em relação às dificuldades de implementação, apenas recentemente se tornou financeiramente viável a aplicação das tecnologias de manutenção 4.0, devido ao barateamento de componentes chave (LEE; BAGHERI; H.KAO, 2015; PORTER; HEP-PERLMANN, 2014).

O presente trabalho visa a avaliar a viabilidade da implementação de um sistema de manutenção preditivo de análise de vibração e termografia, que utiliza as tecnologias e ferramentas da indústria 4.0, em um dos equipamentos da linha de produção de uma indústria fabricante de embalagens de alumínio. Será utilizado como objeto de estudo, um redutor de acionamento do equipamento que será monitorado pelo novo sistema de manutenção. A análise dos modos e efeitos de falha (FMEA) do objeto de estudo, baseada nas teorias de manutenção centrada em confiabilidade, será desenvolvida a fim de comparar os ciclos de manutenção fornecidos pela teoria e pelo sistema sensoriado. Deseja-se também validar as análises obtidas no sistema *on-line* e estimar o tempo de vida útil res-

tante do componente, através de resultado da ferramenta *Predictive maintenance toolbox* do Software *Matlab*.

1.1 Motivação

A chegada da economia globalizada gerou uma forte influência nas indústrias à medida em que elas foram mais demandadas no sentido de aumentar sua capacidade de produção, devendo garantir ainda a qualidade e maior personalização dos produtos fabricados. Diversas metodologias podem ser implementadas para alcançar esse aumento da capacidade de produção de uma indústria, como, por exemplo, aumentar a quantidade de equipamentos que operam na linha de produção, reduzir o tempo de paradas devido a falhas funcionais dos equipamentos, aumentar a velocidade de trabalho da linha, entre outros. Entretanto, a chegada da economia globalizada também influenciou a competitividade entre as empresas fabricantes de favorecer ao consumidor um produto personalizado, com qualidade assegurada e baixo custo de aquisição. Por esse motivo, deve-se levar em conta o custo da implementação da metodologia que permitirá o aumento da capacidade de produção.

A busca pela melhoria contínua no processo produtivo é uma das principais estratégias adotadas para aumentar a disponibilidade dos equipamentos operando na linha de produção. A melhoria contínua visa a observar todos os pontos de perda na produção e avaliar modos de atuação que irão eliminar estes pontos de perda. Geralmente, a perda na produção está relacionada a alguma falha no processo produtivo, quando algum equipamento não está conseguindo executar suas funções primárias ou secundárias. A identificação antecipada dos pontos de falha potencial que estão afetando a produtividade da linha de produção permite executar o planejamento das ações corretivas que deverão ser realizadas para a eliminação desse ponto de falha, antes que esta evolua para uma falha funcional do equipamento que implicará a parada da produção.

O modo pelo qual a manutenção dos equipamentos é executada, se são realizadas atividades reativas ou pró-ativas, impacta diretamente o tempo disponível para a produção. De fato, a detecção antecipada dos potenciais modos de falha assegura que equipe de manutenção esteja mais preparada para a atuação, reduzindo o *downtime* da linha. Entretanto, torna-se necessário avaliar até que ponto o investimento na implementação de sistemas de detecção de falhas será vantajoso para a companhia. Dessa maneira, a motivação do presente trabalho inclui a avaliação dos ganhos obtidos, em termos de confiabilidade e disponibilidade do equipamento, através da implementação de um sistema de manutenção preditivo que permite a detecção antecipada dos modos de falha.

1.2 Justificativa

Apesar dos diversos benefícios que a implementação das técnicas de manutenção preditivas fornecem ao setor industrial, os custos dessa implementação ainda são excessivamente altos, o que dificulta a instalação dessa estratégia nas indústrias. A análise da viabilidade técnica avalia a importância e os ganhos da implementação e, ainda, fornece parâmetros acerca do tempo de retorno do investimento.

Devido a alta demanda da disponibilidade dos equipamentos que garantem maior volume de produção, a busca pela redução de falhas e pela redução do *downtime* da linha de produção se tornaram alguns dos principais objetivos da equipe de manutenção. Por esse motivo, este trabalho se justifica ao avaliar, através dos princípios e das ferramentas da indústria 4.0, a viabilidade de implementação técnica de um sistema de monitoramento preditivo de vibrações mecânicas e de termografia de componentes críticos do equipamento *Necker CMB3400* de uma indústria fabricante de embalagens de alumínio. A implementação deste sistema de monitoramento visa a auxiliar a gestão do planejamento da manutenção a detectar as prováveis falhas críticas, assim como diminuir o tempo de parada da planta, e também aumentar a velocidade dos equipamentos de maneira segura e, conseqüentemente, aumentar a disponibilidade dos equipamentos da linha de produção.

O equipamento utilizado para o estudo de caso do presente trabalho será um equipamento piloto, ou seja, o desempenho de todo o sistema será avaliado e, de acordo com os impactos desta implementação na manutenção, o projeto será replicado para outros equipamentos de alta criticidade da linha de produção. Portanto, o desenvolvimento deste trabalho irá fornecer uma base de dados para a tomada de decisão acerca da viabilidade de instalação do projeto de manutenção preditiva *on-line* em outros equipamentos da linha de produção, de maneira a garantir que essa implementação irá trazer benefícios no âmbito da disponibilidade, da redução de falhas e da redução do *downtime* da planta.

1.3 Objetivos

O objetivo do presente trabalho consiste em analisar a viabilidade técnica de implementação do sistema de manutenção preditiva, através da utilização das ferramentas e conceitos da indústria 4.0 em um equipamento de uma fabricante de embalagens de alumínio.

Os objetivos específicos são apresentados a seguir:

1. Analisar os modos e efeitos de falha do objeto de estudo.
2. Analisar o tempo de vida útil do componente, segundo as técnicas de manutenção

centrada em confiabilidade, em comparação com o tempo de vida útil fornecido pelo novo Sistema Preditivo implementado.

3. Validar o sistema de manutenção preditiva e estimar o tempo de vida útil restante do componente de estudo, através do tratamento dos dados no software *Matlab*.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Conceitos de Confiabilidade

2.1.1 Confiabilidade

A norma NBR5462/1994 define o termo confiabilidade como a capacidade de um item de desempenhar uma função sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo definido. Os autores Kardec e Nascif (2009) abordam a definição de confiabilidade como a probabilidade de um item desempenhar uma função requerida, sob condições definidas de uso (ABNT NBR 5462, 1994).

O conceito de probabilidade pode ser entendido como a relação entre o número de casos favoráveis e o número de casos possíveis, dado um intervalo de tempo especificado. A medida dos valores de probabilidade de ocorrência de um certo evento varia dentro de um intervalo de 0 a 1, em que uma probabilidade de ocorrência igual a 1(ou 100%) exprime a certeza de ocorrência de um determinado evento, e uma probabilidade igual a 0(ou 0%) exprime a certeza de não ocorrência de um determinado evento. Dessa maneira, a afirmação da confiabilidade ser definida como uma probabilidade implica que todos os valores de confiabilidade devem estar entre um intervalo de 0 a 1 (ou entre 0 e 100%). Considera-se que a confiabilidade é a probabilidade de não ocorrer falha, para uma certa função, com um dado nível de confiança (KARDEC; NASCIF, 2009; FOGLIATTO, 2011).

2.1.2 Disponibilidade

A disponibilidade é a medida da capacidade de um item de estar em condição de desempenhar sua função requerida em um intervalo de tempo determinado, levando-se em consideração aspectos da confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção do item. Para Fogliatto (2011), o conceito de disponibilidade varia de acordo com a capacidade de reparo do item. Para um item não reparável, a disponibilidade equivale à confiabilidade. No caso de itens reparáveis, cujos possíveis estados são "em funcionamento" ou "em manutenção", considera-se que após o ato de reparar, o item volta a desempenhar sua função requerida, e trabalha-se agora com um valor médio de disponibilidade, calculado através da equação 2.1 a seguir (ABNT NBR 5462, 1994).

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.1)$$

A equação 2.1 representa a disponibilidade média de um equipamento reparável onde *MTBF* é o tempo médio entre falhas e *MTTR* representa o tempo até a conclusão

de todos os reparos na unidade. Os procedimentos para o cálculo dos indicadores *MTBF* e *MTTR* estão presentes no capítulo 3, no item "Medidas de confiabilidade".

O foco principal da equipe de manutenção é disponibilizar o máximo de horas de operação para o equipamento. Por este motivo, o índice de disponibilidade é um parâmetro de grande importância para a equipe de manutenção e produção. Através deste índice, é possível observar o comportamento operacional da maquinaria e, desta forma, identificar os “equipamentos-problema” da linha de produção (VIANA, 2002).

2.1.3 Manutenibilidade

O conceito de manutenibilidade é expresso pela norma NRB5462/1994 como a capacidade de um item ser mantido em condições de executar as suas funções requeridas quando a manutenção é executada sob condições determinadas e padrões prescritos. A definição probabilística de manutenibilidade pode ser assim apresentada: “É a probabilidade de restabelecer no sistema suas condições de funcionamento específicas, em limites de tempo desejados, quando a manutenção é conseguida nas condições e com os meios prescritos”. Logo, a manutenibilidade se trata da probabilidade de que um equipamento em estado de falha seja reparado em um tempo t especificado (FOGLIATTO, 2011; ABNT NBR 5462, 1994; KARDEC; NASCIF, 2009).

2.2 Tipos de Manutenção

2.2.1 Manutenção Corretiva ou Reativa

De acordo com a Norma ABNT NBR 5462 (1994), o conceito de manutenção corretiva ou reativa é definido como a manutenção realizada após a ocorrência de uma pane, e tem como finalidade reparar o item em falha para que este volte a operar em sua função ideal requerida. A manutenção corretiva é uma intervenção imediata, sem quaisquer definições e planejamentos anteriores, realizados para evitar grandes consequências aos equipamentos de produção, à saúde e à segurança do funcionário e do meio ambiente (VIANA, 2002).

O conceito de manutenção corretiva descrito na Norma NBR5462/1994 não contempla a possibilidade desse tipo de manutenção ser executada de maneira programada. A manutenção corretiva pode ser não programada, ou seja, uma manutenção emergencial que ocorre logo após a falha do instrumento de produção, ou, ainda, pode se tratar de uma manutenção programada, quando se é planejada a atuação em um momento posterior à falha. Usualmente, a programação deste tipo de manutenção ocorre em equipamentos de baixa criticidade que pouco impactam o processo produtivo (GREGORIO; SANTOS; PRATA, 2018; ABNT NBR 5462, 1994).

Quando os custos de baixa disponibilidade de equipamento são menores que o custo para executar as ações que evitam a falha, a estratégia de manutenção corretiva se torna a mais adequada para execução na empresa. Além disso, ao se considerar as consequências da falha, o custo da manutenção preventiva e a importância do equipamento em pane na linha de produção, em alguns casos, pode-se concluir que qualquer outra estratégia diferente da corretiva resulta em gastos excessivos para a companhia (MARCORIN; LIMA, 2003).

As corretivas são caracterizadas pela imprevisibilidade de falha que ocasiona a parada da produção, a diminuição da disponibilidade, a redução do desempenho da máquina, a diminuição da qualidade do processo e o mal-estar da equipe de planejamento e controle de manutenção. Além disso, Marcorin e Lima (2003) afirmam que ao adotar essa estratégia, a empresa necessita adquirir um estoque de peças excessivas para suportar as constantes quebras, de modo a gerar um aumento nos custos de estoque. Conforme Viana (2002), a pane inesperada é o acontecimento mais desagradável na rotina da equipe de produção e manutenção, e que, portanto, as equipes não devem se limitar a ações corretivas cotidianas, mas devem sempre buscar a melhoria contínua do processo.

2.2.2 Manutenção Preventiva

A norma NBR5462/1994 prevê que a manutenção preventiva tem como finalidade reduzir a probabilidade de ocorrência de falha e reduzir a ineficiência de um equipamento presente na linha de produção. Ainda segundo a norma, essa finalidade é alcançada através das intervenções de manutenção executadas em intervalos predeterminados ou baseadas em critérios prescritos (ABNT NBR 5462, 1994).

A execução das atividades de caráter preventivo são pré-analisadas pela equipe de manutenção e, em seguida, o planejamento da intervenção é definido. Essa abordagem de planejamento produz uma drástica redução no fator de improvisação no momento da intervenção preventiva, que, conseqüentemente, garante um ambiente de produção com qualidade significativamente superior àquele em que as manutenções corretivas são majoritariamente executadas (VIANA, 2002).

Essa política, em muitos casos, leva a desperdícios, pois não considera a condição real do equipamento. O simples fato de a manutenção preventiva reduzir o risco de paradas não programadas devido a falhas no equipamento já a coloca como uma opção mais viável do que a manutenção corretiva em máquinas ligadas diretamente ao processo. É importante ressaltar que ela possui alguns pontos a serem considerados. O primeiro é o fato de que a troca de um item por seu tempo de uso apenas pode ser considerada para aqueles que sofrem desgaste. Outro ponto - mesmo nos itens que sofrem desgaste - é a imprevisibilidade, ou seja, o ritmo de desgaste pode não ser uniforme e está sujeito a muitas variáveis. Da mesma forma que é possível trocar uma peça ainda com muito tempo de vida, a falha pode ocorrer antes do tempo previsto.

2.2.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva ou manutenção controlada é caracterizada por garantir a qualidade de serviço desejada, através da aplicação de técnicas de análise das condições reais dos equipamentos. A implementação das técnicas de manutenção preditiva visa a reduzir ao mínimo a execução das manutenções preventivas e corretivas (ABNT NBR 5462, 1994).

O objetivo principal da manutenção preditiva é a determinação do momento correto para intervenção mantenedora, evitando inspeções desnecessárias e desperdícios de componentes. Essa manutenção preditiva trata-se de uma tarefa da manutenção preventiva que, através do monitoramento das condições das máquinas, tenta prever o momento exato da falha, sendo possível programar a atuação da manutenção e garantir a utilidade dos componentes até o máximo de sua vida útil (VIANA, 2002).

Os autores Gregorio, Santos e Prata (2018) definem as técnicas preditivas como manutenção sob condição ou manutenção com base no estado do equipamento, que ocorre através do monitoramento dos parâmetros de interesse do ativo.

A principal vantagem da implementação deste tipo de manutenção é a detecção antecipada das potenciais falhas e panes, que auxilia na definição dos momentos mais adequados para realizar as trocas e os reparos dos equipamentos. Em relação às suas desvantagens, destaca-se o alto custo de implementação desse tipo de manutenção. Os custos de instalação dos equipamentos e da infraestrutura que suporta a manutenção preditiva são considerados inicialmente altos até que todo o investimento inicial de instalação seja pago, e, depois, os custos operacionais tornam-se bastante baixos e estáveis durante toda a vida útil do componente. A figura (1) representa o custo típico de implementação e operação das técnicas de controle de condição dos equipamentos (GREGORIO; SANTOS; PRATA, 2018; MOBLEY, 2002).

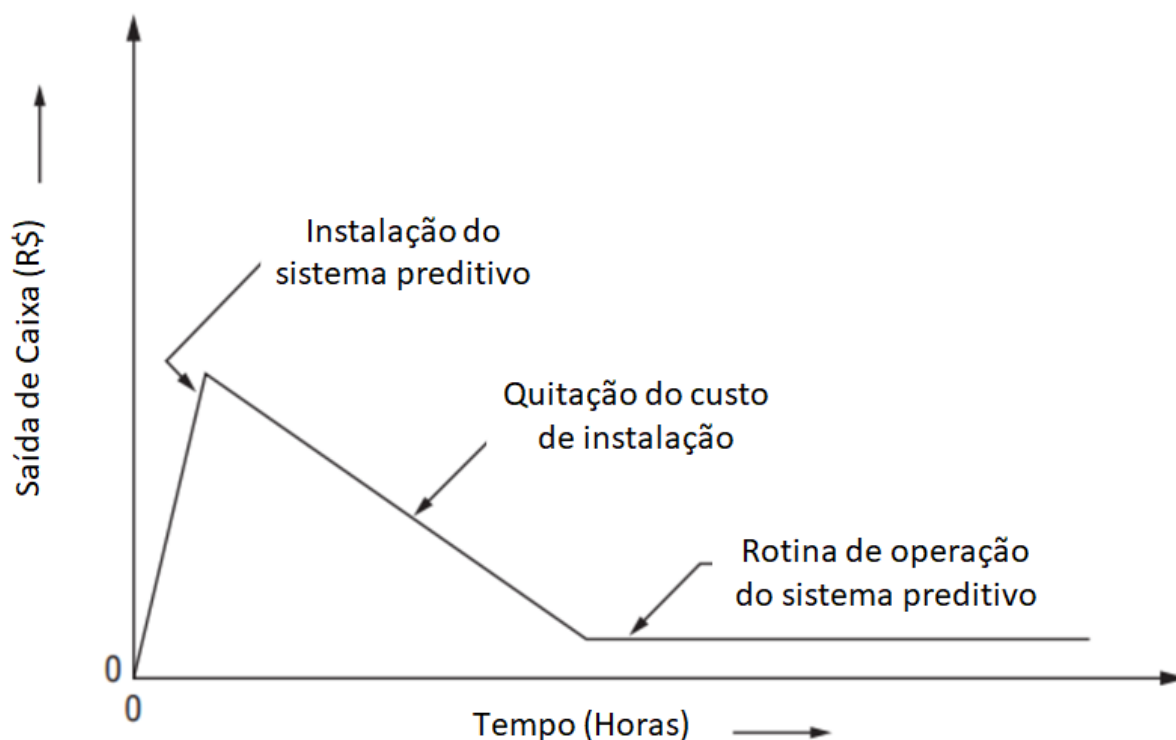


Figura 1 – Custo típico de instalação e operação de sistema de controle preditivo. Fonte: Adaptação de Mobley (2002)

Na figura(1) é possível observar o alto custo de instalação do sistema preditivo e a sua expressiva queda após a quitação do investimento de instalação. Os principais custos, após a quitação do investimento de instalação, se tornam apenas os referentes a de operação do sistema. Assim, de acordo com Mobley (2002), a viabilidade da implementação desta estratégia de manutenção em equipamentos de alta criticidade da linha de produção é alcançada pela estabilidade e pelo baixo custo de manutenção em boa parte da vida útil dos componentes.

Dentre as técnicas de manutenção preditiva, destacam-se as análises de termografia, vibração mecânica, ultrassom e análise de lubrificantes. Devido aos diversos avanços tecnológicos referentes à automação industrial e à implementação dos princípios da indústria 4.0, as técnicas de manutenção preditivas estão em constante evolução. Esse tipo de manutenção permite monitorar as condições dos equipamentos em tempo real e garantir a prevenção da falha, ao utilizar o máximo potencial do componente em funcionamento. O presente trabalho irá abordar a implementação das técnicas de manutenção preditivas de Vibrações Mecânicas e Termografia.

2.2.3.1 Análises preditivas de Vibrações Mecânicas

A vibração mecânica trata-se de uma oscilação em torno de uma posição de referência, sendo as forças dinâmicas que atuam na máquina as responsáveis pela geração de seu movimento vibratório. As vibrações se propagam por toda a estrutura da máquina

em diferentes frequências e amplitudes. Geralmente, a vibração mecânica se constitui de um processo destrutivo, que reduz a vida útil dos componentes através da redução da resistência de seus materiais pelo efeito de falha por fadiga (VIANA, 2002).

O monitoramento das vibrações mecânicas em máquinas com elementos rotativos é de extrema importância para o controle de produção e manutenção estáveis. Os efeitos de uma vibração severa em um equipamento são a fadiga e o desgaste, e esses efeitos são responsáveis por falhas definitivas e críticas no maquinário, o que impacta diretamente a disponibilidade de produção da linha. A coleta de dados provenientes de vibrações mecânicas é geralmente obtida através da utilização de sensores mecânicos, como, por exemplo, sensores do tipo acelerômetros, que emitem sinais elétricos de acordo com a vibração detectada (VIANA, 2002).

A técnica da análise de vibração preditiva, segundo Baldissarelli e Fabro (2019), não se limita ao monitoramento da condição do equipamento, mas também ao diagnóstico das possíveis falhas no sistema e à atribuição de seus respectivos níveis de vibração tolerados para cada tipo de falha identificado. A identificação de falhas a partir de sinais de ruídos e vibração em eixos, engrenagens, rotores, mancais, rolamentos, ventiladores, entre outros componentes, depende de diversos fatores. Alguns destes fatores são (NORTON; KARCZUB, 2003):

- O ruído de fundo ou nível de vibração;
- A velocidade de rotação;
- A localização do sensor de monitoramento;
- A interação dinâmica entre o item e os componentes ao seu redor;
- As características do compartilhamento da carga do item.

As principais causas de vibração mecânica de componentes são desbalanceamento, desalinhamento, folga, imprecisões nas engrenagens e mancais, mancais defeituosos, correias de acionamento ruins, giro de óleo, giro de fricção, desalinhamento de rotor, formas de ressonância, velocidades de rotação críticas, entre outras. Devido às diversas causas de geração de falhas a partir da vibração mecânica, o processo de identificação do tipo e da causa da falha por meio do sensoriamento do sinal de vibração é de grande importância para obter um diagnóstico rápido e garantir uma atuação assertiva (NORTON; KARCZUB, 2003).

Os critérios de aceitação dos níveis de vibração de componentes, operando em vazio ou em carga, são definidos através de diversas normas nacionais e internacionais. Estas normas estabelecem os critérios para medição dos sinais e classificam os equipamentos de

acordo com seu tipo de atuação. As tabelas 2 e 1 destacam algumas normas Internacionais e Nacionais relacionadas à vibração mecânica de componentes (FERREIRA, 2012):

Norma	Descrição
ABNT NBR 10082	Análise de vibrações - Avaliação da vibração mecânica das máquinas com velocidade de operação de 600 rpm a 15000 rpm.
ABNT NBR 10272	Ensaio não destrutivo - Análise de vibrações - Medição e avaliação da severidade das vibrações mecânicas de máquinas elétricas rotativas.
ABNT NBR 15928	Ensaio não destrutivo - Análise de vibrações - Terminologia.
ABNT NBR 10273	Ensaio não destrutivo - Análise de vibrações - Requisitos para instrumentos de medição de severidade de vibração em máquinas.
ABNT NBR 8008	Balanceamento de corpos rígidos rotativos - Qualidade

Tabela 1 – Normas Nacionais relacionadas à Vibração Mecânica. Fonte: Adaptado de Ferreira (2012).

Norma	Descrição
ISO 2954	<i>Mechanical vibration of rotating and reciprocating machinery - requirements for instruments for measuring vibration severity.</i>
ISO 1940-1	<i>Mechanical vibration – Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state – Part I: specification and verification of balance tolerances.</i>
ISO 1940-2	<i>Mechanical vibration – Balance quality requirements of rigid rotors- Part 2: Balance errors.</i>
ISO 7919-1	<i>Mechanical vibration of non-reciprocating machines – measurements on rotating shafts and evaluation criteria – Part 1: General Guidelines.</i>
ISO 7919-3	<i>Mechanical vibration of non-reciprocating machines – measurements on rotating shafts and evaluation criteria – Part 3: Coupled industrial machines.</i>
ISO 7919-5	<i>Mechanical vibration of non-reciprocating machines – measurements on rotating shafts and evaluation criteria – Part 5: Machines sets in hydraulic power generating and pumping plants.</i>
ISO 8821	<i>Mechanical vibration – Balancing – Shaft and fitment key convention.</i>
ISO 10814	<i>Mechanical vibration – Susceptibility and sensitivity of machines to unbalance.</i>
ISO 10816-1	<i>Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements of non-rotating parts – Part 1: General Guidelines. (substituída antiga VDI/ISO 2372).</i>
ISO 10816-3	<i>Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements of non-rotating parts – Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 rpm and 15.000 rpm when measured in situ.</i>
ISO 10817-1	<i>Rotating shaft vibration measuring systems – Part 1: Relative and absolute sensing of radial vibration.</i>
ISO 13373-1	<i>Condition monitoring and diagnostics of machines – vibration condition monitoring – Part 1: General procedures.</i>
ISO 13373-2	<i>Condition monitoring and diagnostics of machines – vibration condition monitoring – Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data.</i>
ISO 15242-2	<i>Rolling bearings – Measuring methods for vibration – Part 2: Radial ball bearings with cylindrical bore and outside surface.</i>
ISO 15242-3	<i>Rolling bearings – Measuring methods for vibration – Part 2: Radial spherical and tapered roller bearings with cylindrical bore and outside surface.</i>

Tabela 2 – Normas Internacionais relacionadas à Vibração Mecânica. Fonte: Adaptado de Ferreira (2012).

As normas que sugerem os limites aceitáveis de vibração para os equipamentos, de

acordo com suas especificações de funcionamento, são a NBR10082/2011, a ISO7919/2009 e a ISO10816/2013. De acordo com a norma NBR10082/2011, a classificação do grau de severidade de vibração é definida através de dois parâmetros: (i) O tipo de máquina e potência desenvolvida e (ii) A flexibilidade dos suportes dos mancais. Em relação ao tipo de máquina avaliada, a norma NBR10082/2011 distingue os equipamentos em dois grupos, em que o primeiro se refere à máquinas com potência acima de 300 kW, que geralmente possuem mancais de escorregamento, e o segundo grupo se refere à equipamentos com potência entre 15 kW a 300 kW, que normalmente possuem mancais de rolamento e rotação acima de 600 rpm. A flexibilidade dos suportes dos mancais é avaliada em relação à sua montagem, sendo ela rígida ou flexível (ABNT NBR 10082, 2011; ISO 10816, 2013) (ISO 7919, 2009).

A determinação da severidade de vibração em máquinas rotativas, ainda segundo a norma NBR10082/2011, é estabelecida através de três critérios: (i) A magnitude de vibração, (ii) A variação da magnitude de vibração e (iii) A avaliação da severidade por meio de análise espectral do sinal. A magnitude de vibração é determinada através da vibração máxima de cada zona de avaliação (Zona A, Zona B, Zona C e Zona D), para cada classe de montagem, onde (ABNT NBR 10082, 2011):

- Zona A: Máquinas novas ou revisadas;
- Zona B: Máquinas com vibrações dentro desta zona são consideradas aceitáveis para operação em longo termo;
- Zona C: Máquinas com vibrações nessa zona são consideradas inoperantes a longo termo, sendo operadas até certo período até a necessidade de realizar uma intervenção corretiva;
- Zona D: Máquinas com vibrações suficientes para danificar a máquina.

A figura 2 representa a severidade de vibração para cada zona, de acordo com o tipo de máquina e sua potência desenvolvida (grupo 1 ou grupo 2), e em relação à flexibilidade dos suportes dos mancais (rígidos ou flexíveis).

Severidade de Vibração	Grupo de máquinas			
Valor da Velocidade (mm/s)	Grupo 1		Grupo 2	
0.71	A	A	A	A
1.4	A	A	A	A
2.3	B	B	B	B
2.8	B	B	B	B
3.5	C	B	B	B
4.5	C	C	C	B
7.1	D	C	C	C
11.0	D	D	D	C
	D	D	D	D
Estado da base da máquina	Rígida	Flexível	Rígida	Flexível
	A: Bom	B: Satisfatório	C: Insatisfatório	D: Inaceitável
Grupo 1:	Máquinas grandes (300kW - 50MW)		Grupo 2:	Máquinas médias (15kW-300kW)

Figura 2 – Severidade de vibração em máquinas rotativas de acordo com a norma ABNT NBR 10082. Fonte: Adaptado de ABNT NBR 10082 (2011).

A norma ISO10816/2013 é responsável por determinar a severidade de vibração para as máquinas, através de monitoramento de partes não rotativas. Para a avaliação dos limites de vibração aceitáveis, a norma faz uma distinção entre diferentes classes de equipamento, como pode ser observado (ISO 10816, 2013):

- Classe I : Refere-se a máquinas de pequeno porte, partes individuais de máquinas e motores que são integralmente conectadas à máquina completa em sua condição de operação normal. Um exemplo desta classe são motores elétricos de até 15 kW.
- Classe II: Refere-se a máquinas de médio porte, sem fundação especial para motores elétricos com potência desenvolvida de 15 a 75 kW, e para motores ou máquinas rigidamente montadas com potência de até 300 kW.
- Classe III: Refere-se a turbomáquinas, grandes acionadores ou grandes máquinas com massa rotativa montada sobre fundação dura e pesada.
- Classe IV: Refere-se a turbomáquinas, grandes acionadores ou grandes máquinas com massa rotativa montada sobre fundação que são relativamente suaves na direção da medição da vibração.

A figura 3 representa a severidade de vibração das máquinas, através do monitoramento das partes não rotativas de acordo com a norma internacional ISO 10816 (2013).

Velocidade de vibração	Máquina		Classe I - Máquinas Pequenas	Classe II - Máquinas Médias	Classe III - Máquinas Grandes com base rígida	Classe IV - Máquinas Grandes com base não rígida
	in/s	mm/s				
	0.01	0.28				
	0.02	0.45				
	0.03	0.71				
	0.04	1.12		Bom		
	0.07	1.80				
	0.11	2.80	Satisfatório			
	0.17	4.50				
	0.28	7.10	Insatisfatório			
	0.44	11.2				
	0.70	18.0	Inaceitável			
	0.71	28.0				
	1.10	45.0				

Figura 3 – Severidade de vibração segundo a norma ISO 10816. Fonte: Adaptado de ISO 10816 (2013)

Entende-se, então, que a determinação da severidade do nível de vibração mecânica de um certo componente é baseada em normas nacionais e internacionais estabelecidas. O planejamento para atuar corretivamente em um componente se dá ao determinar-se que seus níveis de vibração estão acima do ideal estabelecido pela norma e ao investigar e identificar o diagnóstico daquela falha específica. Dessa maneira, o aproveitamento do máximo da vida útil do componente será garantido e a atuação corretiva realizada será assertiva em relação ao tipo de falha identificada.

2.2.3.2 Análises preditivas de Termografia

A técnica de acompanhamento da variação da temperatura dos componentes é o método mais fácil para identificar possíveis alterações na condição dos equipamentos, componentes e do próprio processo. A elevação da temperatura para barramentos e equipamentos elétricos, por exemplo, representa geralmente o mau contato entre os componentes, e a elevação da temperatura em mancais de máquinas rotativas pode ser resultado de desgaste ou problemas de lubrificação dos mancais. Logo, a implementação de técnicas de acompanhamento da variação de temperatura de componentes é fortemente indicada, a fim de obter maiores informações sobre as condições de funcionamento dos equipamentos e determinar os momentos exatos para atuações corretivas (KARDEC; NASCIF, 2009).

A termografia é uma técnica preditiva de inspeção não invasiva e não destrutiva, que tem como objetivo detectar a radiação infravermelha emitida naturalmente por um componente. O processo de emissão de radiação infravermelha é natural de todo corpo e a intensidade desta emissão depende exclusivamente de dois fatores: da temperatura do componente e de sua emissividade. Assim, por meio desta técnica de detecção da radiação infravermelha dos componentes é possível identificar pontos e regiões em que

a temperatura encontra-se alterada em relação a padrões ideais estabelecidos (BAUER, 2013).

O instrumento utilizado para converter a radiação infravermelha emitida em imagens digitais é denominado câmara termográfica. O funcionamento das câmaras termográficas consiste na conversão da radiação captada em pulsos elétricos, e posteriormente na amplificação e conversão em sinais digitais. Os sinais digitais são traduzidos em imagens coloridas, em escalas de cores cinzas e em cores que correspondem à temperatura do objeto. A figura 4 representa o resultado de uma análise de termografia de um painel elétrico (SANCHES, 2009).



Figura 4 – Exemplo de análise de termografia de painéis elétricos utilizando câmera termográfica. Fonte: IFELL (2021).

A técnica da análise de termografia, obtida através de câmeras termográficas, é amplamente utilizada para a detecção de alterações nas condições ideais de funcionamento dos equipamentos. Geralmente, o monitoramento da variação de temperatura dos componentes por meio dessa técnica é executado em intervalos definidos, não sendo realizado um acompanhamento em tempo real desses parâmetros de interesse. Logo, com o objetivo de obter rápidos diagnósticos de falha e de realizar o planejamento antecipado da manutenção, a tendência para este tipo de monitoramento é de sensoriar os equipamentos críticos com termostatos, que fornecerão os sinais equivalentes às temperaturas dos componentes analisados em tempo real.

A determinação dos métodos, instrumentos e procedimentos adequados para realização das análises de termografia é referenciada em algumas normas técnicas nacionais e internacionais. As normas referentes às técnicas preditivas de termografia podem ser observadas na tabela 3.

Norma	Descrição
ABNT NBR 15572	Ensaio não destrutivo - Termografia - Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos.
ABNT NBR 15424	Ensaio não destrutivo - Termografia - Terminologia.
ISO 18436-7	<i>Condition monitoring and diagnostic of machines - Requirements for qualification and assessment of personnel - Part 7: Thermography.</i>

Tabela 3 – Normas Nacionais e Internacionais relacionadas às análises de Termografia.
Fonte: Autora.

2.3 Estatística da confiabilidade

2.3.1 Função densidade de probabilidade

A função densidade de probabilidade ($f(t)$) é caracterizada por representar o comportamento de variáveis aleatórias em um dado experimento. A curva da função densidade é uma aproximação da distribuição dessas variáveis aleatórias. A figura 5 representa um histograma de um conjunto de variáveis aleatórias, que descrevem uma distribuição específica (DODSON; SCHWAB, 2006).

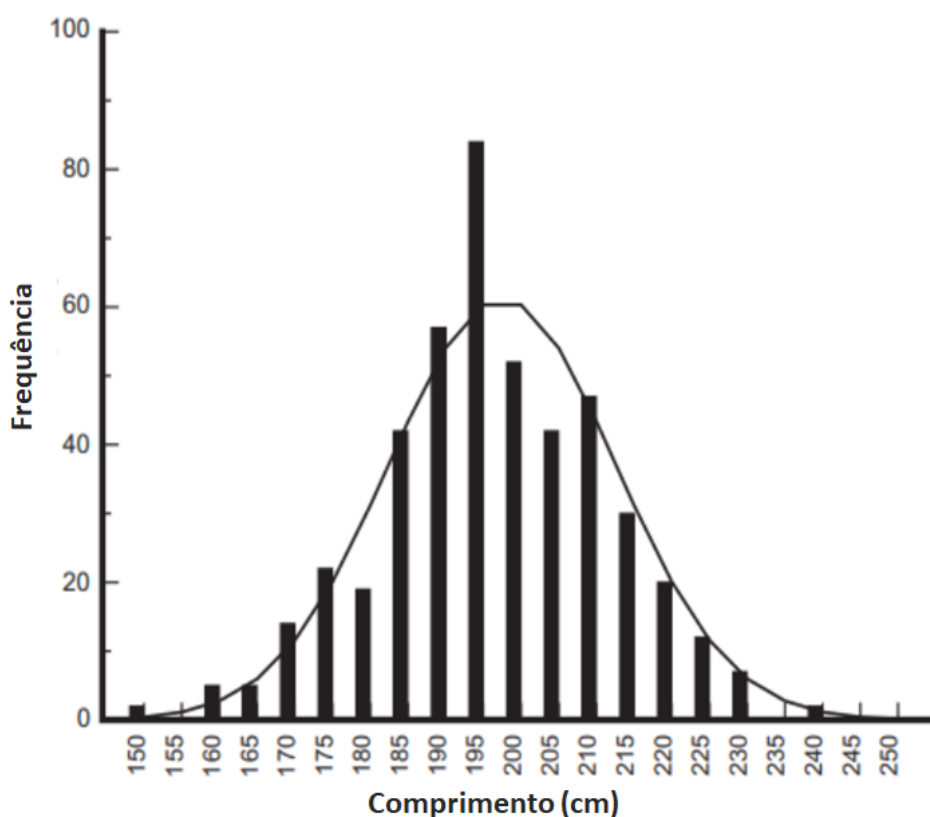


Figura 5 – Histograma de variáveis aleatórias. Fonte: Dodson e Schwab (2006)

A função densidade de probabilidade é apresentada na figura 5 pela curva sobreposta ao histograma, que abrange todo o espaço amostral do experimento. Por esse

motivo, a área abaixo da curva de densidade de probabilidade deve ser igual a 1. Portanto, a área abaixo dessa curva, à esquerda de um dado valor de X , é igual à probabilidade da variável aleatória representada no eixo X . No que se refere à figura 6, a região sombreada representa a probabilidade de uma única amostra - sorteada aleatoriamente na população - possuir um comprimento menor do que 185, o que corresponde a aproximadamente 17% de probabilidade de ocorrência (DODSON; SCHWAB, 2006).

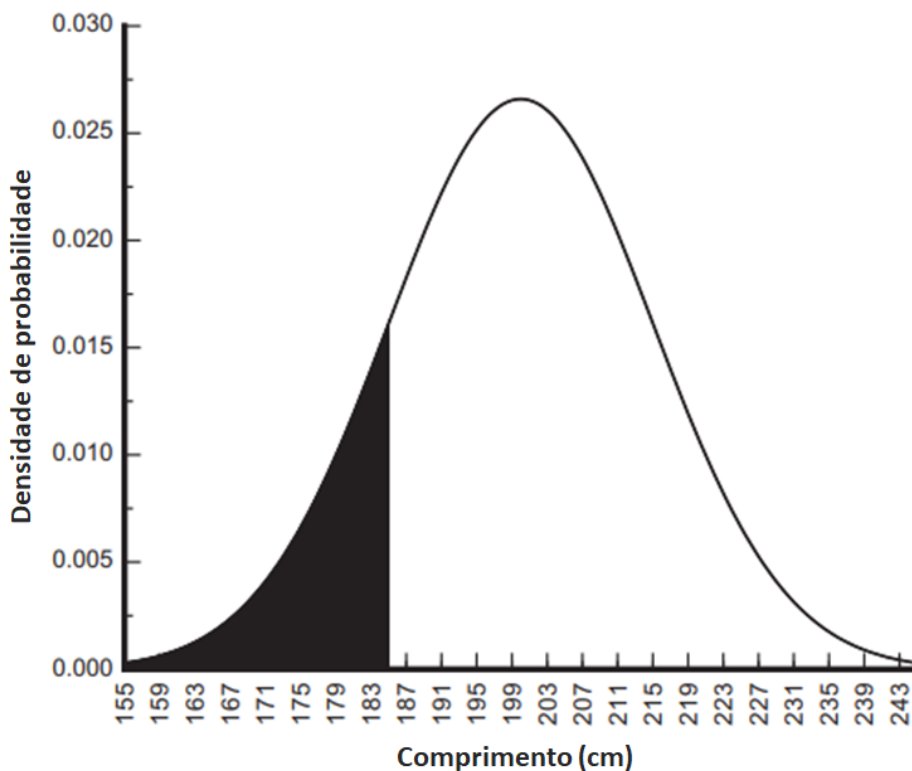


Figura 6 – Exemplo densidade de probabilidade. Fonte: Dodson e Schwab (2006)

A partir da função densidade de probabilidade é possível determinar outra importante função para calcular as medidas de confiabilidade: a função densidade acumulada de falha. Na figura 6, a função acumulada equivale à área sombreada da função densidade de probabilidade, ou seja, corresponde à integral da função densidade de probabilidade, no intervalo sombreado destacado.

A densidade $f(t)$ é caracterizada por um vetor de parâmetros, que são estimados ao utilizar-se de dados de tempo até a falha dos componentes. Os parâmetros utilizados nas distribuições de probabilidade dos estudos de confiabilidade podem ser classificados em três categorias: localização, escala e forma. Os parâmetros de localização são conhecidos como parâmetros de garantia ou de vida mínima e são responsáveis por deslocar a distribuição ao longo do eixo do tempo. Os classificados como parâmetros de escala são utilizados para contrair ou expandir a distribuição no eixo do tempo. Já os parâmetros de forma afetam o formato em si da função de densidade de probabilidade. Para a determina-

ção desses parâmetros das funções de densidade, são utilizados, principalmente, o método da máxima verossimilhança e o método dos mínimos quadrados (DODSON; SCHWAB, 2006).

2.3.1.1 Estimação dos parâmetros: Máxima verossimilhança

Os parâmetros das funções de confiabilidade do presente trabalho serão estimados a partir do método da máxima verossimilhança. O estimador de máxima verossimilhança é definido pelo valor do parâmetro que maximiza o valor da função de verossimilhança. A equação 2.2 representa uma função de verossimilhança, para uma amostra de tamanho n de t_1 a t_n em uma população de variáveis aleatórias de T_1 a T_n , que seguem uma distribuição $f(t, \theta)$ (FOGLIATTO, 2011).

$$L(\theta) = f(t_1, \theta) \cdot f(t_2, \theta) \cdot \dots \cdot f(t_n, \theta) \quad (2.2)$$

O parâmetro θ é desconhecido e deve ser determinado. A função exposta na equação XX indica a possibilidade de as variáveis T_1 a T_n assumirem os valores da amostra t_1 a t_n , que podem ser calculadas pelo valor da função densidade para cada valor de t_1 a t_n . O valor que maximiza a função $L(\theta)$, ou seja, o estimador de máxima verossimilhança é obtido ao derivar função $L(\theta)$ em relação a θ e igualar o resultado da derivada a zero. A equação 2.3 apresenta o método para determinação do estimador de máxima verossimilhança para a função $L(\theta)$ (FOGLIATTO, 2011).

$$\frac{\partial L(\theta)}{\partial(\theta)} = 0 \quad (2.3)$$

O método da máxima verossimilhança também é utilizado em situações de estimação de diferentes parâmetros desconhecidos θ_1 a θ_n . Para isso, a função de verossimilhança se torna uma função dos n parâmetros desconhecidos, e os estimadores de máxima verossimilhança são determinados a partir das n derivadas parciais da função verossimilhança igualadas a zero (FOGLIATTO, 2011).

2.3.2 Medidas da confiabilidade

No estudo da confiabilidade, tanto a função densidade de probabilidade quanto a função densidade acumulada de falha têm o papel de determinar outras importantes medidas da confiabilidade, como, por exemplo, a função de confiabilidade $R(t)$, a função de risco $H(t)$ e o tempo médio até a falha ($MTTF$).

2.3.2.1 Função de confiabilidade $R(t)$

A função de confiabilidade é um complemento da função densidade acumulada de falha $F(t)$, pois a função densidade acumulada representa a probabilidade de falha do ativo, e a função de confiabilidade representa a probabilidade de sobrevivência do ativo. Portanto, a confiabilidade é definida como a probabilidade acumulada de sucesso do ativo. A equação 2.4 representa a formulação matemática da equação de confiabilidade $R(t)$ em relação ao tempo (t), a função densidade acumulada de falha ($F(t)$) e a função densidade de probabilidade da distribuição ($f(u)$) (FOGLIATTO, 2011).

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(u)du = \int_t^{+\infty} f(u)du \quad (2.4)$$

2.3.2.2 Função de risco $h(t)$

A função de risco é uma medida de confiabilidade que representa a quantidade de risco associado a um ativo no tempo. Essa função também é conhecida como taxa de falha instantânea ou taxa de risco. Matematicamente, a taxa de falha instantânea pode ser definida por meio da equação 2.5, que considera $f(t)$ a função densidade de probabilidade da distribuição e $R(t)$ a função de confiabilidade.

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t} = \frac{-R'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}, t \geq 0 \quad (2.5)$$

A forma como a função de risco se comporta indica a maneira como uma unidade envelhece ao longo do tempo. Geralmente, as funções de risco de um ativo podem apresentar três diferentes comportamentos: o crescente, o decrescente e o constante. O comportamento crescente indica uma incidência de risco que cresce com o tempo, o que caracteriza a deterioração do produto e falhas por desgaste no final de sua vida útil. O comportamento decrescente indica maior incidência de risco nas fases iniciais de operação da unidade e a diminuição desse risco ao longo do tempo. Esse comportamento é decorrente de deficiências no processo de manufatura da unidade, o que leva a falhas precoces na fase de mortalidade infantil. Já o comportamento constante representa um nível uniforme de risco durante todo o tempo de vida útil do ativo. Este comportamento é observado quando a incidência da falha na unidade se deve a condições extremas no ambiente de operação, que podem ocorrer a qualquer momento no tempo de operação da unidade (FOGLIATTO, 2011).

Outra medida de interesse para o estudo da confiabilidade é a função de risco acumulada $H(t)$, que é obtida através da integral da função de risco instantânea sobre um período de tempo. Essa função acumulada oferece uma representação da função de risco na forma de uma função não decrescente. A equação 2.6 representa a função de risco acumulada.

$$H(t) = \int_0^t h(u)du, t \geq 0 \quad (2.6)$$

2.3.3 Distribuições de probabilidade em confiabilidade

Para melhor compreender a confiabilidade de um sistema, é importante que se conheça a distribuição de probabilidade que melhor se ajuste às suas funções de probabilidade de sobrevivência. Ao identificar a distribuição mais adequada, é possível estimar tanto a probabilidade de sobrevivência do sistema quanto as outras medidas de confiabilidade apresentadas anteriormente - como a função de confiabilidade, a função de risco, o tempo médio entre falhas, entre outros. As principais distribuições utilizadas no estudo da confiabilidade são as seguintes:

- Distribuição exponencial;
- Distribuição de Weibull;
- Distribuição Gamma;
- Distribuição Lognormal:

A distribuição exponencial é considerada importante para o estudo da confiabilidade, pois além de se tratar da única função que possui uma função de risco constante, também é considerada matematicamente simples para a resolução das expressões derivadas. O parâmetro a ser determinado pelo método da máxima verossimilhança na distribuição exponencial é o λ (FOGLIATTO, 2011) (DODSON; SCHWAB, 2006).

Já a distribuição de Weibull é uma das mais utilizadas nos estudos da confiabilidade devido à sua capacidade de representação das amostras de tempos até a falha com comportamentos diversos. Os parâmetros a serem estimados na função distribuição de Weibull são o parâmetro de forma γ e o parâmetro de escala θ . Por possuir um parâmetro de forma, a distribuição de Weibull é considerada flexível e permite a abrangência, em sua função, de uma grande variedade de dados. A função de risco de Weibull é diretamente influenciada pelo fator de forma γ , sendo caracterizada como uma função crescente para $\gamma > 1$, constante para $\gamma = 1$ e decrescente para $\gamma < 1$ (FOGLIATTO, 2011) (DODSON; SCHWAB, 2006).

Semelhante à distribuição de Weibull, a distribuição gamma possui uma flexibilidade nos formatos da função que garantem uma grande abrangência de dados distintos. A função gamma Γ é uma integral definida tabelada, utilizada para a determinação das medidas de confiabilidade de uma distribuição gamma. Da mesma maneira que a distribuição de Weibull, o parâmetro de forma γ da distribuição gamma também influencia o comportamento da função de risco $h(t)$ do sistema. Entretanto, no caso da distribuição

gamma, a função de risco é crescente para $\gamma < 1$, constante para $\gamma = 1$ e decrescente para $\gamma > 1$. Além do fator de forma γ , a distribuição gamma também possui um parâmetro de escala a ser determinado: o λ (FOGLIATTO, 2011; DODSON; SCHWAB, 2006).

Para considerar que um tempo de falha siga uma distribuição lognormal, é necessário que $\gamma = \ln(t)$ seja normalmente distribuído. A distribuição lognormal é uma função limitada à esquerda que é muito utilizada na estimativa de tempo até o reparo de sistemas reparáveis. A distribuição lognormal apresenta dois parâmetros a serem estimados pelo método da máxima verossimilhança, são eles: o parâmetro de localização μ - equivalente à média logarítmica - e o parâmetro de escala σ - equivalente ao desvio padrão logarítmico. O parâmetro de escala σ é responsável pela assimetria à direita da distribuição gamma, ou seja, a assimetria da distribuição é variada à medida que os valores do parâmetro σ são variados (FOGLIATTO, 2011; DODSON; SCHWAB, 2006).

Nas medidas de confiabilidade da distribuição gamma, a função $\phi(x)$ representa o valor da distribuição normal padronizada, e a função $\Phi(x)$ trata do valor da função densidade da distribuição normal padronizada(FOGLIATTO, 2011; DODSON; SCHWAB, 2006).

A tabela 4 apresenta as equações referentes a função densidade de probabilidade, função confiabilidade e função de risco para as distribuições acima citadas.

	f(t)	R(t)	h(t)
Exponencial	$\lambda e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	λ
Weibull	$\frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1} e^{-t^\gamma/\theta}$	$e^{-(\frac{t}{\theta})^\gamma}$	$\frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1}$
Gamma	$\frac{\lambda}{\Gamma(\gamma)} (\lambda t)^{\gamma-1} e^{-\lambda t}$	$1 - \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^{\lambda t} x^{\gamma-1} e^{-x} dx$	$f(t)/R(t)$
Lognormal	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma t}} \exp \left\{ \frac{-1}{2} \left[\frac{(\ln t - \mu)}{\sigma} \right]^2 \right\}$	$\Phi \left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma} \right)$	$\frac{\varphi[(\mu - \ln t)/\sigma]}{\Phi[(\mu - \ln t)/\sigma]}$

Tabela 4 – Função densidade de probabilidade, função confiabilidade e função de risco para as distribuições estudadas. Fonte: Fogliatto (2011).

Ainda para a determinação dos indicadores de manutenção é importante destacar as equações para o cálculo do tempo até a falha para cada distribuição analisada. As equações do MTTF para cada distribuição podem ser observados na tabela 5

	Exponencial	Weibull	Gamma	Lognormal
MTTF	$1/\lambda$	$\theta\Gamma(1 + 1/\gamma)$	γ/λ	$e^{(\mu+\sigma^2)/2}$

Tabela 5 – Determinação do indicador MTTF para as distribuições estudadas. Fonte: Fogliatto (2011).

2.3.3.1 Ajuste de dados e teste de aderência

Para realizar a determinação da distribuição que mais se adequa à amostra em estudo, utilizam-se duas principais estratégias: (i) a estratégia gráfica, por meio de his-

togramas de frequência, e (ii) a analítica, por meio de testes de aderência. A análise de histograma de frequência pode ser utilizada como uma hipótese inicial para observação da distribuição mais similar aos dados amostrais. A constatação das distribuições mais adequadas para representar o espaço amostral, com base nos histogramas de frequência, muitas vezes não é suficiente para definir a distribuição ideal a ser utilizada nos estudos estatísticos, sendo necessário utilizar-se da técnica de testes de aderência para determinar essa distribuição (FOGLIATTO, 2011).

Os testes de aderência mais utilizados para essa aplicação são os testes do Quiquadrado e o de Kolmogorov-Smirnov(KS). O teste de aderência do Quiquadrado consiste em calcular a soma dos quadrados das diferenças entre as frequências esperadas e frequências empíricas. Assim, se o somatório ultrapassar um valor tabelado específico, a aderência da distribuição é rejeitada. O teste de Kolmogorov-Smirnov é semelhante ao método do Quiquadrado, porém o teste KS utiliza-se das frequências acumuladas ao invés das frequências absolutas dos dados amostrais. Assim, o método KS é considerado não paramétrico, de uso mais adequado em casos em que poucos dados amostrais estão disponíveis para a análise (FOGLIATTO, 2011).

2.4 Manutenção Centrada em Confiabilidade

A manutenção centrada em confiabilidade (MCC) consiste em um programa que reúne diversas técnicas de engenharia que garantem que os equipamentos da linha de produção continuarão cumprindo sua função requerida. Conforme Moubray (1997), principal estudioso e divulgador na área de MCC, define-se a manutenção centrada em confiabilidade como um programa utilizado para determinar o que deve ser feito para garantir que os ativos físicos da empresa permaneçam executando suas funções requeridas pelos usuários. A MCC utiliza-se da técnica de determinação das diversas formas de falha de um componente, visualizando, então, quais as ações de bloqueio que deverão ser realizadas (VIANA, 2002; FOGLIATTO, 2011).

Um programa de MCC efetivo contempla sete questões básicas:

1. Quais são as funções e padrões de desempenho de um ativo no seu contexto presente de operação?
2. De que forma ele falha no cumprimento suas funções?
3. O que causa cada falha funcional?
4. O que acontece quando ocorre a falha?
5. De que forma cada falha importa?

6. O que pode ser feito para prever ou prevenir cada falha?
7. O que pode ser feito se não for encontrada uma tarefa pró-ativa apropriada?

Os próximos subtópicos irão discutir como cada uma dessas questões devem ser abordadas.

2.4.1 Funções e padrões de desempenho

1. Quais são as funções e padrões de desempenho de um ativo no seu contexto presente de operação?

A função do equipamento é o primeiro entendimento na implementação do programa de MCC, e esta função estabelece a base de trabalho para todo o programa. Antes mesmo de determinar o que deve ser feito para garantir que o ativo continue executando o que é requerido pelo seu usuário, é necessário determinar, primeiramente, o que o usuário espera que o equipamento execute e se o que é esperado pode ser desempenhado pelo equipamento. A função dos ativos no contexto operacional pode ser dividida em duas categorias: as funções primárias e as funções secundárias (MOUBRAY, 1997; FOGLIATTO, 2011).

As funções primárias correspondem às principais atribuições que os ativos devem cumprir, resumem por que o ativo foi adquirido, ou seja, qual a função principal que ele deve executar. As funções secundárias representam todas as outras funções que devem ser cumpridas pelos ativos, como, por exemplo, as expectativas dos usuários na segurança, no conforto, na integridade estrutural e na eficiência do ativo. As funções primárias e secundárias dos ativos devem ser identificadas de maneira a direcionar o programa MCC (MOUBRAY, 1997).

2.4.2 Falhas e modos de falha

2. De que forma ele falha no cumprimento suas funções?

Após a determinação das funções primárias e secundárias, o programa de manutenção centrada em confiabilidade segue para a determinação das possíveis falhas funcionais dos ativos. Quando um ativo não executa as funções requeridas pelos usuários, é dito que o ativo encontra-se em estado de falha. Os estados de falha no contexto da MCC são denominados falhas funcionais, pois essas falhas ocorrem quando o equipamento é incapaz de desempenhar a função requerida em um padrão de desempenho determinado pelo usuário. Por outro lado, a falha parcial de um ativo representa o estado de falha em que o item ainda executa as funcionalidades, mas em um nível inaceitável de desempenho (MOUBRAY, 1997).

3. *O que causa cada falha funcional?*

Após a identificação das possíveis falhas funcionais de um ativo, deve-se determinar seus respectivos modos de falha, que é a denominação dos modos pelos quais os equipamentos podem vir a falhar. Os modos de falha são eventos passíveis de ocorrer que caracterizam a falha de um ativo ao cumprir suas funções requeridas. De acordo com Moubray (1997), boa parte da lista de modos de falha de um item incorporam falhas causadas por deterioração ou desgaste. Outros modos comumente evidenciados são as falhas por erros humanos e as falhas de projeto (KARDEC; NASCIF, 2009; FOGLIATTO, 2011).

2.4.3 Efeitos de Falha

4. *O que acontece quando ocorre a falha?*

O quarto passo para o programa MCC, após a determinação dos modos de falha, implica listar os efeitos da falha. Os efeitos da falha descrevem o que acontece após a ocorrência de cada modo de falha. O detalhamento desta etapa é de grande importância para assegurar que as ações de manutenção sejam dirigidas à raiz do problema e não aos sintomas (MOUBRAY, 1997; FOGLIATTO, 2011).

O Autor Moubray (1997) destaca algumas informações que devem ser incluídas ao listar os efeitos de falha:

- Evidência da ocorrência da falha, caso exista;
- De que modo a falha pode afetar a segurança ou o meio ambiente;
- De que forma a produção é afetada;
- Qual o dano físico gerado pela falha, caso exista;
- O que deve ser executado para reparar a falha.

2.4.4 Consequências da Falha

5. *De que forma cada falha importa?*

Uma análise detalhada acerca de todos os possíveis modos de falhas de uma indústria de médio porte pode gerar uma lista de uma até dez mil itens. Cada uma das falhas determinadas afeta a organização de certa forma - pode afetar, por exemplo, a produção, a qualidade, a segurança, o meio ambiente, entre outros. Como o reparo de cada falha requer a utilização de tempo dos funcionários e de capital da organização, uma análise sobre a criticidade da consequência da falha deve ser executada a fim de ditar a melhor estratégia da manutenção (MOUBRAY, 1997).

A consequência da falha é uma avaliação do quanto a falha é relevante para a organização. Ou seja, se uma falha gera consequências de alta criticidade, todos os esforços da equipe de manutenção estarão voltados para prevenir esta falha. Por outro lado, caso a falha pouco impacte a organização, pode-se definir um plano de manutenção simples que inclua apenas a limpeza e lubrificação básica do item. Logo, a avaliação das consequências da falha é de extrema importância para organização, pois ela dita quais falhas serão o foco de atuação da equipe de manutenção (MOUBRAY, 1997).

De forma geral, Moubray (1997) categoriza as consequências da falha em quatro itens:

- Consequências escondidas: falhas que não possuem impacto imediato, mas que podem expor a organização a outras falhas mais críticas;
- Consequências para a segurança: falhas que ameaçam a saúde e segurança das pessoas envolvidas na organização;
- Consequências ambientais: falhas que causam prejuízos ao meio ambiente;
- Consequências operacionais: falhas que prejudicam a produção no sentido de seu desempenho e qualidade.

2.4.5 Tarefas pró-ativas e reativas

6. O que pode ser feito para prever ou prevenir cada falha?

Depois de conhecidas todas as consequências das falhas e avaliadas seu grau de criticidade para a organização, deve-se identificar as ações que devem ser tomadas para prevenir ou impedir a ocorrência da falha. De maneira geral, são categorizadas as técnicas de gerenciamento das falhas em dois grupos, as tarefas pró-ativas e as tarefas reativas (ou ações *default*) (MOUBRAY, 1997).

As tarefas pró-ativas são executadas anteriormente à ocorrência da falha, de maneira a prevenir que o item entre em estado de falha. Essas atividades contemplam as chamadas estratégias de manutenção preventivas e preditivas. As tarefas reativas envolvem o reparo de itens que já se encontram em estado de falha. As ações reativas, equivalentes à estratégia de manutenção corretiva, são geralmente realizadas quando não é possível ou vantajoso para a organização executar uma atividade pró-ativa eficaz (FOGLIATTO, 2011).

7. O que pode ser feito se não for encontrada uma tarefa pró-ativa apropriada?

Ao considerar os casos em que as consequências das falhas são críticas e não é possível realizar atividades pró-ativas para repará-las, torna-se necessário buscar por atividades de inspeção de falhas ou pelo chamado redesenho de subsistema. O autor Moubray

(1997) destaca que a procura por falhas envolve uma inspeção periódica de funções escondidas dos equipamentos, para garantir a ausência de falhas. O redesenho de subsistema representa alterações em componentes, conjuntos e sistemas que facilitem a operação de manutenção. Para a antecipação das falhas potenciais do ativo, a utilização da abordagem da redundância e da sinalização por alarmes é indicada para os itens com consequência de falha de alta criticidade (FOGLIATTO, 2011).

2.4.6 Padrão de falha

O entendimento de como a falha se desenvolvia em um equipamento, no período anterior à Segunda Guerra Mundial, era simplesmente o de que, com o passar do tempo de operação, os componentes envelheciam e se desgastavam, e isso propiciava a falha. De fato, no período denominado 1^a geração, o comportamento das falhas nos componentes seguia esse padrão (padrão B), pois os equipamentos na época eram simples e pouco mecanizados. No decorrer da Segunda Guerra Mundial (2^a geração), o nível de mecanização dos equipamentos cresceu exponencialmente, incentivando a implementação de ações de manutenção proativa e trazendo à tona um novo perfil de padrão de falha. Surge então o padrão de falha conhecido como “curva da banheira” (padrão A), em que há uma alta incidência de falha no início da operação, e chega a um patamar constante durante boa parte de sua vida útil. Ao final, o equipamento entra em uma fase de desgaste acentuado (VIANA, 2002).

O desgaste na fase inicial de operação do item se justifica pela grande incidência de itens com defeito de fabricação, erros de projeto, falhas de aplicação ou erros de instalação. O perfil da manutenção sofreu grandes alterações após os anos de 1970, na chamada 3^a geração, pois não mais se admitiam paradas de máquinas não programadas. Portanto, a busca pela alta disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos favoreceu a implementação de diversas técnicas inovadoras e eficientes de manutenção. Ainda neste período, pesquisas evidenciaram que o padrão da “curva da banheira” não era o único padrão de ocorrência de falha nos equipamentos, e, pelo contrário, verificou-se que o padrão de falha pode se encaixar em seis diferentes tipos (VIANA, 2002; MOUBRAY, 1997).

Além dos padrões A e B já apresentados, destaca-se ainda a existência de quatro padrões. O padrão C representa um lento crescimento da probabilidade de falha e não existe um período de desgaste identificável. O padrão D mostra uma baixa probabilidade de falha quando o equipamento é novo e um crescimento rápido para um nível constante de probabilidade. O padrão E apresenta uma probabilidade de falha constante durante toda a vida útil do componente. Por último, o padrão F indica a alta probabilidade no início da operação, chegando a um patamar constante depois de certo tempo. A figura 7 representa todos os tipos de padrão de ocorrência de falha ao longo do tempo (VIANA, 2002).

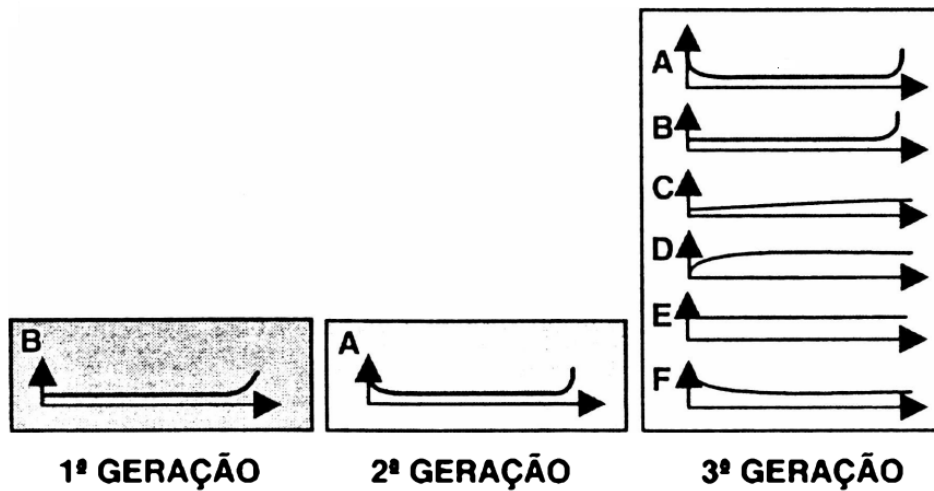


Figura 7 – Padrões de Falha. Fonte: Viana (2002)

À medida que os equipamentos tornam-se mais complexos, os principais padrões de ocorrência de falha encontrados nestes equipamentos são os padrões E e F. A afirmação anterior foi comprovada através de uma pesquisa realizada por uma fabricante de aeronaves, a *United Airlines*, que indicava que grande parte dos seus aviões seguiam o padrão F. As distribuições dos padrões de falha obtidos na pesquisa da fabricante de aviões pode ser observado na figura ??.

Distribuição dos padrões de taxas de falhas

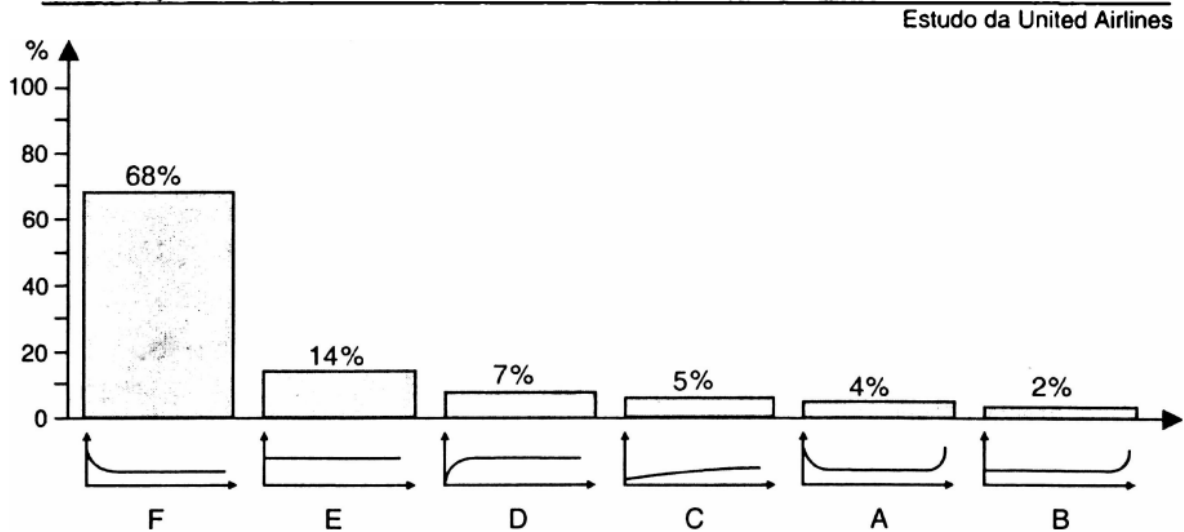


Figura 8 – Estudo da *United Airlines* da distribuição dos padrões de falha. Fonte: Viana (2002)

2.4.6.1 Curva de Falha Potencial

Alguns itens em operação, a partir do momento que começam a apresentar desgaste, passam a fornecer uma espécie de alarme, que caracteriza o início de uma falha

ou um sintoma que, em um determinado espaço de tempo, resultará em uma falha. A identificação de algum modo de falha no equipamento em operação, no momento anterior à ocorrência da falha funcional, é de grande interesse para a equipe de manutenção, pois é possível tomar decisões de prevenção de falhas e evitar suas consequências. O ponto no processo da falha no qual é possível identificar que determinado item está se aproximando de sua falha funcional é denominado falha potencial (MOUBRAY, 1997; VIANA, 2002).

A curva P-F, representada pela figura 9, apresenta o comportamento de um componente, ao longo do tempo, que começa a apresentar uma falha potencial. Observa-se que a curva se deteriora e, a partir de certo momento, é identificado um ponto de falha potencial. Caso nenhuma ação seja tomada para prevenir a ocorrência da falha, a curva permanecerá se deteriorando até atingir o ponto que representa a falha funcional do equipamento.

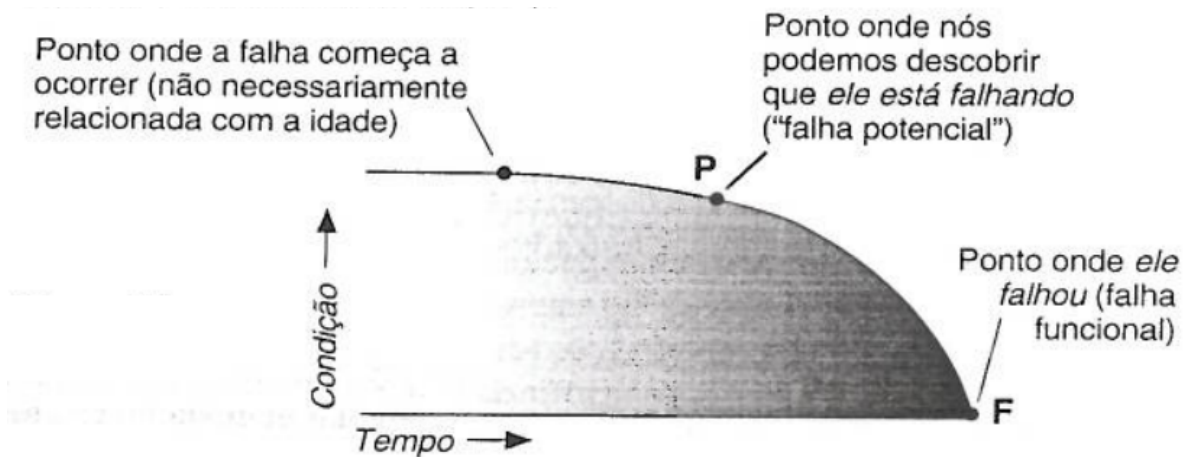


Figura 9 – A curva P-F. Fonte: Moubray (1997)

A manutenção realizada no intervalo entre os pontos P e F é determinada pela manutenção sob-condição. As tarefas sob-condição são denominadas dessa maneira pois os itens inspecionados são deixados sob uma condição em que permanecem a desenvolver o padrão de desempenho ideal (MOUBRAY, 1997).

2.5 Indústria 4.0

Devido aos recentes avanços tecnológicos, o aumento na procura por produtos personalizados, com maior qualidade e custo reduzido resultou no desenvolvimento de uma nova estratégia para os modelos industriais, conhecida como indústria 4.0. O termo indústria 4.0 surgiu a partir de uma proposta do Governo Federal Alemão de desenvolver um modelo com alta tecnologia para favorecer a competitividade da indústria manufatureira do país. Esse novo modelo abrange tecnologias de ponta com o objetivo de transformar os

sistemas de produção em sistemas mais colaborativos e flexíveis (SANTOS et al., 2018; KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

O contexto da indústria 4.0 aborda a implementação generalizada de sensores e dispositivos inteligentes no ambiente de produção, dando origem a sistemas denominados Sistemas Ciberfísicos (CPS). Esses sistemas interagem entre si através da Internet das coisas (IoT), que analisam dados da produção e da performance dos equipamentos. Segundo Sakurai e Zuchi (2018), conectar as máquinas, ativos, sistemas e pessoas permite que as empresas possam criar redes inteligentes capazes de controlar, de forma autônoma, sua produção(SANTOS et al., 2018).

As principais tecnologias presentes no modelo industrial 4.0 são Sistemas Ciberfísicos, Internet das Coisas, Big Data, Computação em Nuvem e Aprendizado de Máquina. O CPS engloba produtos, máquinas e dispositivos inteligentes que se comunicam entre si, de maneira autônoma, e com o mundo físico ao seu redor. A IoT é responsável por conectar todos esses dispositivos inteligentes a uma rede de internet que possibilita a troca de informações em tempo real. A tecnologia Big Data junto à Computação em Nuvem auxiliam a coleta, o armazenamento e a análise dos dados obtidos através de diversas fontes. Logo, a atuação em conjunto dessas tecnologias possibilita a tomada de decisão assertiva, o fácil acesso às informações de interesse, a otimização das operações e a melhora no desempenho do sistema como um todo (SANTOS et al., 2018).

A implementação desse novo modelo industrial está condicionada ao cumprimento de alguns princípios da chamada indústria 4.0. O primeiro princípio está relacionado a capacidade de operação automatizada, que deve ser alcançada através da aquisição e tratamento de dados coletados em tempo real, garantindo, assim, uma maior agilidade na tomada de decisão. O princípio da descentralização destaca a importância do CPS ser o responsável pela tomada de decisão, de maneira que as necessidades da produção sejam atendidas automaticamente. Já o princípio da modularidade se relaciona à necessidade da produção de atender uma certa demanda, criando módulos de produção que permitem alterar as entregas das máquinas. Por último, o princípio da interoperabilidade se trata da capacidade dos CPS, dos funcionários e das fábricas inteligentes de se comunicarem através da IoT(SAKURAI; ZUCHI, 2018).

2.5.1 Sistemas Ciberfísicos

Os Sistemas Ciberfísicos (*Cyber Physical Systems*) referem-se a uma nova abordagem de sistemas com capacidades físicas e computacionais que possibilitam sua interação com seres humanos através de diversas modalidades. Esse sistema é constituído de uma estrutura modular que realiza o monitoramento do processo produtivo físico, ao criar uma espécie de cópia virtual desse processo. Os sistemas ciberfísicos são os responsáveis pela interação entre os espaços físicos e virtuais através da integração da computação, das

redes e do armazenamento, criando um ambiente industrial interativo (BAHETI; GILL, 2011; PIVOTO et al., 2021).

O foco principal dos sistemas ciberfísicos é realizar a ligação em rede de vários dispositivos. Por esse motivo, os CPS consistem em uma unidade de controle que lida com sensores e atuadores capazes de interagir com o mundo físico, processando os dados obtidos e comunicando-os a outros sistemas. Logo, os CPS podem ser vistos como sistemas capazes de enviar e receber dados de diversos dispositivos através de uma rede (PIVOTO et al., 2021).

2.5.2 Internet das Coisas

A Internet das Coisas (*Internet of Things*) refere-se à tecnologia que conecta objetos a uma rede. A IoT forma uma rede de objetos interconectados que coletam dados e interagem com o mundo físico através de atuações, comandos e controles. A IoT potencializa a eficiência dos dispositivos, dando a estes a capacidade de coletar, compartilhar e processar dados com outros dispositivos, criando, então, uma rede que se comunica e interage com ambientes físicos e virtuais (GUBBI et al., 2013).

A aplicação da Internet das Coisas na indústria é conhecida como Internet Industrial das Coisas ou *Industrial Internet of Things* (IIoT). O conceito de IIoT representa a conexão em rede de dispositivos industriais (sensores e atuadores) que possibilita a coleta, o monitoramento, a análise e a alteração rápida de dados (PIVOTO et al., 2021).

Os benefícios da aplicação da IoT no ambiente industrial são diversos, como a melhora da performance da produção, a melhor utilização de ativos, a minimização do custo do ciclo de vida do ativo, entre outros. Os autores Pivoto et al. (2021) afirmam que, junto a esses benefícios, algumas dificuldades podem ser evidenciadas na implementação das IoT's no ambiente industrial, como, por exemplo, o surgimento de problemas relacionados à comunicação entre redes e sistemas de interoperabilidade, devido à grande quantidade de arquiteturas criadas por diferentes autores.

2.5.3 Big Data

O Big Data (*Big Data Analytics*) é definido como extensas e complexas estruturas de dados que utilizam novos modelos de coleta, processamento e gerenciamento de informações. O termo Big Data refere-se à grande quantidade de dados coletados e armazenados no processo produtivo a cada instante a partir dos inúmeros dispositivos inteligentes conectados às redes (IoT). Estes dados podem ser obtidos através de diversas fontes como os sistemas de gestão dos clientes, os equipamentos presentes na linha de produção, os sistemas de gestão dos fornecedores da matéria prima, entre outros (PEREIRA; SIMONETTO, 2018).

Os dados são palavras, números ou sinais que representam fatos sobre uma realidade objetiva, e devem ser processados e contextualizados a fim de gerar uma informação que seja útil para a tomada de decisão. Dessa maneira, devido à grande quantidade de dados e à sua necessidade de processamento, o desenvolvimento de poderosas ferramentas de análise são imprescindíveis para a geração de informação rápida e assertiva para a companhia(COELHO, 2016).

O grande volume de dados gerados instantaneamente e sua necessidade de processamento resultam em grande dificuldade de garantir a qualidade dos dados coletados e das informações geradas a partir destes. Segundo Berg e Wilts (2018), além de garantir que sejam utilizados os dados corretos para a geração da informação, para assegurar a qualidade, é necessário utilizar alguns padrões e procedimentos que disponibilizem a informação de maneira compreensível e transferível.

2.5.4 Computação na Nuvem

A Computação em Nuvem (*Cloud-computing*) trata-se de um grande banco de armazenamento de dados capaz de ser acessado em diversos lugares em um curto período de tempo, na ordem de milissegundos, por meio de dispositivos inteligentes conectados à internet. Ao invés de realizar o armazenamento de dados localmente, o que implica um grande investimento em discos, a utilização do serviço de armazenamento por meio da computação em nuvem significa armazenar a informação em servidores *on-line* que podem ser facilmente acessados e sincronizados(BORLIDO, 2017; RUBMANN et al., 2015).

A utilização da capacidade de armazenamento de servidores e computadores compartilhados e conectados à rede de internet, segundo Borlido (2017), proporciona vantagens à utilização de serviços de *cloud-computing*, sendo elas a sincronização automática dos dados e a segurança de armazenamento da informação.

2.5.5 Aprendizado de Máquina

O aprendizado de máquina (*Machine Learning*) é definido por Esteves et al. (2018) como um campo da ciência da computação que evoluiu do estudo do aprendizado em inteligência artificial. A primeira definição de aprendizado de máquina foi evidenciada no ano de 1959, por Samuel (1959), que resumia o conceito como o campo de estudo que proporciona aos computadores a habilidade de aprender sem a necessidade de serem explicitamente programados. Em resumo, o aprendizado automático da máquina busca o desenvolvimento de algoritmos que aprendam através de seus erros e que façam previsões sobre o comportamento dos próximos dados de entrada.

Na área de análise de dados, o aprendizado de máquina é utilizado como método para desenvolver algoritmos complexos e modelos analíticos com habilidades de gerar

predições. Os modelos analíticos garantem que os cientistas de dados, os responsáveis pela tomada de decisão e os analistas possam produzir resultados e decisões confiáveis e repetíveis, e ainda, descobrir os comportamentos ocultos através das tendências históricas dos dados e do aprendizado das relações. No uso comercial, o conceito de aprendizado de máquina no campo da análise de dados é conhecido como análise preditiva (ESTEVES et al., 2018).

3 Metodologia

3.1 Medidas de confiabilidade

A função de confiabilidade, representada por $R(t)$, é dada pela probabilidade de um item não falhar em um determinado intervalo de tempo. A norma NBR5462/1994 define a função de confiabilidade como a probabilidade de um item desempenhar sua função requerida, sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo. Considerando o intervalo de tempo transcorrido de $(t - \Delta t, t)$, em que $n_f(t)$ representa as unidades que falharam e $n_s(t)$ representa as unidades sobreviventes, a função probabilidade pode ser descrita pela equação ?? (FOGLIATTO, 2011).

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_f(t)} \quad (3.1)$$

3.1.1 Tempo médio até a falha - MTTF

O tempo médio até a falha (*Mean Time To Failure* - MTTF) é a medida da esperança matemática do tempo de falha de um item. Essa medida pode ser expressa através da integral da função de confiabilidade em relação ao tempo. A MTTF pode ser expressa pela equação 3.2 (ABNT NBR 5462, 1994; FOGLIATTO, 2011).

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (3.2)$$

3.1.2 Tempo médio entre falha - MTBF

O indicador do tempo médio entre falhas (*Mean Time Between Failure* - MTBF) representa a esperança matemática do tempo entre falhas de um item. Este indicador pode ser calculado através da divisão da soma das horas disponíveis do equipamento para a operação (H_d) pelo número de intervenções corretivas realizadas no equipamento no período analisado (N_c). O indicador é utilizado para analisar o comportamento do equipamento diante das ações mantenedoras. O interesse da equipe de manutenção é aumentar o indicador do MTBF, pois isso significa que há uma redução no número de corretivas executadas e, conseqüentemente, um aumento nas horas disponíveis de operação do equipamento. A equação 3.3 representa uma abordagem de cálculo do MTBF (VIANA, 2002; ABNT NBR 5462, 1994).

$$MTBF = \frac{H_d}{N_c} \quad (3.3)$$

3.1.3 Tempo médio de reparo - MTTR

O tempo médio de reparo (*Mean Time to Repair* - MTTR) representa o tempo de indisponibilidade para a produção devido à ação da manutenção (HI_M), dividido pelo número de intervenções corretivas realizadas no período analisado (N_c). Pode-se deduzir através da equação 3.4 que quanto menor a medida do MTTR melhor é o andamento do trabalho da manutenção, pois as atividades corretivas demonstram menor impacto na produção(VIANA, 2002).

$$MTTR = \frac{HI_M}{N_c} \quad (3.4)$$

3.1.4 Método estatístico: A distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é uma das principais distribuições utilizadas nos estudos de confiabilidade devido a sua flexibilidade de representação dos dados de falha com comportamentos muito distintos. Para as afirmações, $t \geq 0$, $\gamma > 0$ e $\theta > 0$, as equações 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 representam a abordagem da distribuição de weibull para a função densidade de probabilidade, a função confiabilidade, a função de risco e o tempo até a falha da unidade, respectivamente.

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} t^{\gamma-1} e^{-t^\gamma/\theta} \quad (3.5)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} \quad (3.6)$$

$$h(t) = \frac{\chi}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} \quad (3.7)$$

$$MTTF = \theta\Gamma(1 + 1/\gamma) \quad (3.8)$$

Para determinação do MTTF, é necessário utilizar a integral indefinida tabelada Γ . O método dos estimadores de máxima verossimilhança é o mais adequado para definição dos parâmetros de forma γ e de escala θ . Para tempos até a falha que seguem a distribuição de Weibull, a respectiva função de verossimilhança é apresentada na equação 3.9.

$$L(\gamma, \theta) = \frac{\gamma}{\theta} \prod_{i=1}^n t_i^{\gamma-1} e^{-\frac{1}{\theta} \sum_{i=1}^n t_i^\gamma} \quad (3.9)$$

Para prosseguir com a determinação dos parâmetros γ e θ , são calculadas as derivadas do logaritmo da função 3.9 com relação a γ e θ e igualadas a zero. As derivadas são rearranjadas resultando nas equações 3.10 e 3.11.

$$\frac{\sum_{i=1}^n t_i r_{\ln t_i}}{\sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\Gamma}}} - \frac{1}{\Gamma} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i = 0 \quad (3.10)$$

$$\theta = \left[\sum_{i=1}^n t_i \Gamma / n \right]^{\frac{1}{n}} \quad (3.11)$$

A partir da equação 3.10, observa-se que a estimativa do parâmetro γ deve ser obtida iterativamente pois é impossível isolá-lo de forma independente na equação. Assim, o parâmetro γ é substituído na equação 3.11, sendo possível determinar o parâmetro θ .

Dessa forma, após a definição dos parâmetros de forma e escala é possível aplicá-los as equações de confiabilidade 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 da função distribuição de Weibull. A função de Weibull é considerada adequada para a modelagem de uma variedade extensa de situações que as unidades apresentem funções de risco distintas.

3.2 Ferramenta da manutenção para aumento da confiabilidade

3.2.1 Análise de Modos e Efeitos de Falha

A análise de modos e efeitos de falha, conhecida por FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*), é uma abordagem de gerenciamento de risco que auxilia a identificação e a priorização de falhas potenciais em equipamentos, processos ou sistemas. Os objetivos da implementação dessa abordagem incluem o reconhecimento e a avaliação das potenciais falhas de um equipamento, como também a identificação de ações que irão reduzir a possibilidade de ocorrência das falhas. O FMEA pode ser aplicado em três diferentes níveis: o nível do produto, o nível do processo e o nível do sistema (KARDEC; NASCIF, 2009; FOGLIATTO, 2011).

O FMEA no projeto é dedicado a eliminar todas as causas de falha no período de projeto do equipamento, ou seja, em sua fase de desenvolvimento, levando em consideração os aspectos de manutenibilidade, operação e segurança. No nível de processo, o FMEA engloba o equipamento que já está em operação e focaliza no aspecto de como o equipamento é operado e mantido. O FMEA no sistema é dedicado à identificação de falhas e gargalos no processo geral, como, por exemplo, em uma linha de produção (KARDEC; NASCIF, 2009).

A equipe responsável pelo desenvolvimento do documento do FMEA deve ser multidisciplinar para que ocorra a complementaridade de conhecimentos e para que seja possível identificar diferentes modos de falha de maneira mais facilitada. Este grupo de desenvolvimento deve ser formado pela equipe de manutenção, engenheiros, operadores, técnicos, gestores, entre outros que tenham o conhecimento do objeto de estudo. Para a abordagem do presente trabalho será utilizado o FMEA no processo, pois se deseja avaliar

os modos e efeitos de falha do equipamento *Necker CMB3400*, que já opera na linha de produção de latas de alumínio (KARDEC; NASCIF, 2009).

3.2.1.1 FMEA de Processo

A análise dos modos e efeitos de falha no processo é uma técnica analítica utilizada para assegurar que todos os potenciais modos de falha do processo serão considerados e discutidos pela equipe de desenvolvimento da análise. As falhas relacionadas aos erros e deficiências de projeto não devem ser consideradas na construção do FMEA de processo. Portanto, a abordagem desenvolvida não deve se basear em alterações no projeto do equipamento para superar as deficiências no processo (FOGLIATTO, 2011).

A documentação a ser preenchida, para a implementação da abordagem do FMEA, é uma espécie de planilha em que devem ser identificados os itens, as funções, os modos, os efeitos, os controles de prevenção e as ações recomendadas. Além disso, deve-se ainda avaliar cada uma das falhas potenciais quanto ao seu nível de severidade, detecção e ocorrência.

A primeira etapa de preenchimento da documentação é a identificação dos itens e das funções do componente analisado. A descrição do propósito deve ser detalhada de maneira a abordar todas as funções do equipamento e, caso alguma operação possua mais de uma função associada a diferentes tipos de falha, deve-se listar cada uma separadamente. Recomenda-se dividir o preenchimento dessa etapa em três colunas: (i) etapa, (ii) operação e (iii) propósito (FOGLIATTO, 2011).

A próxima etapa do processo é a identificação dos modos de falha para cada uma das funções anteriormente destacadas. A lista de falhas potenciais é desenvolvida com base na experiência e no entendimento do grupo desenvolvedor. Para uma maior facilidade de identificação, os modos de falha podem ser separados em duas categorias. A primeira categoria está relacionada à redução da capacidade do equipamento, ou seja, ele está operando com um desempenho abaixo do que se é esperado. É possível listar as cinco principais causas da redução da capacidade de um equipamento (MOUBRAY, 1997).

- Falhas de lubrificação;
- Sujeira;
- Erro Humano;
- Deterioração;
- Montagem/Desmontagem.

A segunda categoria dos modos de falha se refere ao aumento no desempenho desejado. Esse aumento desejado do desempenho ocorre quando o ativo é, de certa forma,

“forçado” a ter uma performance acima da sua capacidade de operação. Os ativos que são submetidos a esse aumento de desempenho desejado geralmente são levados à falha pelo aumento da deterioração das causas de tensão no equipamento (MOUBRAY, 1997).

Após evidenciar todos os modos de falha, torna-se necessário identificar os efeitos potenciais referentes a cada modo anteriormente determinado. O efeito de um modo de falha pode ser a causa de um modo de falha em uma próxima operação. Por esse motivo, é necessário realizar uma avaliação acerca da severidade do efeito de falha (FOGLIATTO, 2011).

A análise da severidade do efeito de falha é realizada de maneira qualitativa, na qual se avalia o impacto que o efeito do modo de falha tem sobre a operação, a qualidade do produto e a satisfação do cliente final. Dessa maneira, os efeitos dos modos de falha são avaliados quanto a sua severidade de ocorrência em uma escala de 1 a 10, onde 1 representa um efeito pouco severo e 10 significa um efeito muito severo. A tabela 6 pode ser utilizada como referência para a avaliação da severidade dos efeitos dos modos de falha (FOGLIATTO, 2011).

Severidade do efeito		Escala
Muito alta	Compromete a segurança da operação ou envolve infração a regulamentos governamentais	10
		9
Alta	Provoca alta insatisfação do cliente	8
		7
Moderada	Provoca insatisfação devido à queda do desempenho ou mau funcionamento.	6
		5
Baixa	Provoca uma leve insatisfação, o cliente observa uma leve deterioração ou queda no desempenho	4
		3
Mínima	Falha que afeta minimamente o desempenho do sistema	2
		1

Tabela 6 – Tabela de referência para a avaliação da Severidade do efeito da falha. Fonte: Adaptado de Fogliatto (2011).

A próxima etapa do desenvolvimento do documento do FMEA é a identificação das causas raízes do problema. A causa da falha é entendida como uma deficiência no processo cuja consequência é o modo de falha. Nessa etapa de identificação das causas, devem ser evidenciadas todas as falhas ou mecanismos de falha cujas probabilidades de ocorrência não sejam nulas. Da mesma maneira que os efeitos de falha devem ser avaliados quanto à sua severidade de ocorrência, as causas da falha também devem ser avaliadas quantitativamente acerca da sua probabilidade de ocorrência (MOUBRAY, 1997; FOGLIATTO, 2011).

A ocorrência da falha está relacionada à probabilidade de que uma causa ou um mecanismo de falha ocorra. Da mesma forma que a avaliação da severidade, a ocorrência

é avaliada em uma escala de 1 a 10, onde 1 representa a baixa probabilidade de ocorrência e 10 significa a alta probabilidade de ocorrência da causa. Pode ser utilizada a tabela 7 como referência para a avaliação da ocorrência das falhas (FOGLIATTO, 2011; KARDEC; NASCIF, 2009).

Ocorrência do modo		Escala
Muito alta	Falhas quase inevitáveis	10 9
Alta	Falhas ocorrem com frequência	8 7
Moderada	Falhas ocasionais	6 5 4
Baixa	Falhas raramente ocorrem	3 2
Mínima	Falhas muito improváveis	1

Tabela 7 – Tabela de referência para a avaliação da Ocorrência do efeito da falha. Fonte: Fogliatto (2011).

Os controles de prevenção e os métodos de detecção da falha são os próximos parâmetros a serem determinados no FMEA. Nessa etapa é necessário listar os controles implementados no processo com o objetivo de impedir ou detectar a causa e seu respectivo modo de falha. O preenchimento deste item deve considerar as atividades que asseguram a robustez do processo ao modo ou à causa de falha. Ainda no preenchimento dessa etapa, devem-se levar em conta apenas os controles de prevenção e os métodos de detecção já existentes no processo, pois o item “ações de recomendação” é designado às sugestões de melhoria que podem ser implementadas no processo para reduzir a incidência das falhas (FOGLIATTO, 2011) (KARDEC; NASCIF, 2009).

Também deve ser realizada uma avaliação quantitativa acerca da capacidade de detecção do modo de falha. A detecção se refere a uma estimativa da capacidade dos atuais controles de detectar as falhas na operação. A escala utilizada para a avaliação da detecção também varia de 1 a 10, em que o valor 1 representa uma situação favorável de detecção e o valor 10 significa uma grande dificuldade de identificação do modo de falha. A tabela 8 serve como referência para a avaliação da detecção dos modos de falha (FOGLIATTO, 2011) .

Detecção do Modo		Escala
Muito Remota	Os controles não irão detectar esse modo de falha, ou não existem controles	10
Remota	Os controles provavelmente não irão detectar esse modo de falha	9 8
Baixa	Há uma baixa probabilidade de os controles detectarem esse modo de falha	7 6
Moderada	Os controles podem detectar o modo de falha	5 4
Alta	Há uma alta probabilidade de os controles detectarem o modo de falha	3 2
Muito Alta	É quase certo que os controles irão detectar esse modo de falha	1

Tabela 8 – Tabela de referência para a avaliação da detecção do efeito da falha. Fonte: Fogliatto (2011).

Através da avaliação da severidade do efeito de falha, da ocorrência e da detecção do modo de falha, utiliza-se um novo indicador para priorizar as ações de correção e melhoria do processo: o indicador do risco. A fórmula geral utilizada para calcular o fator de risco de cada falha é expresso pela equação 3.12 (KARDEC; NASCIF, 2009).

$$R = S * O * D \quad (3.12)$$

O valor do risco varia em uma escala de 1 a 1000, sendo influenciado diretamente pelas medidas de severidade, ocorrência e detecção. Através do indicador de risco, a equipe de manutenção pode priorizar suas ações de correção para as falhas que apresentarem indicadores de risco mais acentuados.

A última etapa do processo de desenvolvimento da documentação do FMEA é a recomendação de ações. O campo de ações recomendadas deve se dirigir aos itens que apresentaram maiores indicadores de risco. Essas ações podem contemplar a incorporação de novos procedimentos, a revisão dos procedimentos atuais, a utilização de novas tecnologias, entre outros. Logo, o preenchimento da documentação do FMEA identifica, avalia e propõe soluções para os diferentes tipos de falha que têm a probabilidade de ocorrência do equipamento.

3.3 Equipamento *Necker CMB3400*

3.3.1 Funcionamento geral do equipamento

O equipamento *Necker CMB 3400* é uma máquina multiestágio que realiza a conformação do pescoço de latas de alumínio e que cria um raio de concordância no fundo da lata para aumentar sua resistência ao abaulamento. O equipamento é adaptável às diferentes dimensões de latas, e sua velocidade de operação recomendada pelo fabricante é de 3400 unidades de lata por minuto. A figura 10 apresenta o aspecto do produto após passar por todas as etapas de conformação do equipamento *Necker*.



Figura 10 – Produto antes e depois do processo de formação do pescoço. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

O processo executado pela máquina formadora de pescoço pode ser subdividido em 3 etapas:

- Conformação do pescoço;
- Conformação do flange;
- Reconformação do fundo da lata.

A atuação da máquina é iniciada através do recebimento das latas em uma torre de alimentação do equipamento, sendo posteriormente transportadas para a *Waxer*. Na *Waxer*, a lata passa por um rolo de borracha que, pelo contato direto com um rolo de aço que alimenta e distribui cera, transfere a cera para a parte superior da lata, onde futuramente ocorrerá a formação do pescoço. A cera aplicada atua como um lubrificante que permite uma conformação suave do pescoço da lata, o que evita o estresse e os defeitos gerados pela conformação do material. Após aplicação da cera, a lata é transferida para as estações de conformação.

3.3.1.1 Estação de conformação do pescoço

A conformação do pescoço da lata é um processo gradativo, de maneira que, para alcançar a forma desejada do pescoço, a lata deve passar por várias estações de conformação. O equipamento utilizado como objeto de estudo do presente trabalho contém o

total de 12 estações de conformação. A quantidade de estações necessárias para a formação do pescoço da lata depende das dimensões da lata produzida. A figura 11 representa diferentes formatos e padrões de produtos disponíveis para a produção.



Figura 11 – Padrões de produto produzidos pela fabricante. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Atualmente, a fabricante de latas de alumínio produz o formato 9.1oz e, para a formação do pescoço em latas deste formato, é necessário utilizar apenas cinco estações de conformação das 12 disponíveis pelo equipamento. Além da utilização de apenas cinco estações de conformação do pescoço, o equipamento é operado a uma velocidade aproximadamente 12% superior à velocidade de operação sugerida pelo fabricante, sendo ainda mais imprescindível o monitoramento em tempo real dos componentes de alta criticidade do equipamento.

A estação de conformação é composta por uma torre dianteira, que comporta doze pistões de base, e uma torre traseira, que comporta doze pistões de ferramenta. Cada estação apresenta, então, 12 posições de conformação, e a movimentação dos pistões de base e de ferramenta das doze posições ocorre com o movimento dos eixos direcionados pelo came dianteiro (relacionado ao movimento dos pistões de base) e came traseiro (relacionado ao movimento dos pistões de ferramenta). A localização dos pistões de base e de ferramenta é apresentada na figura 12.

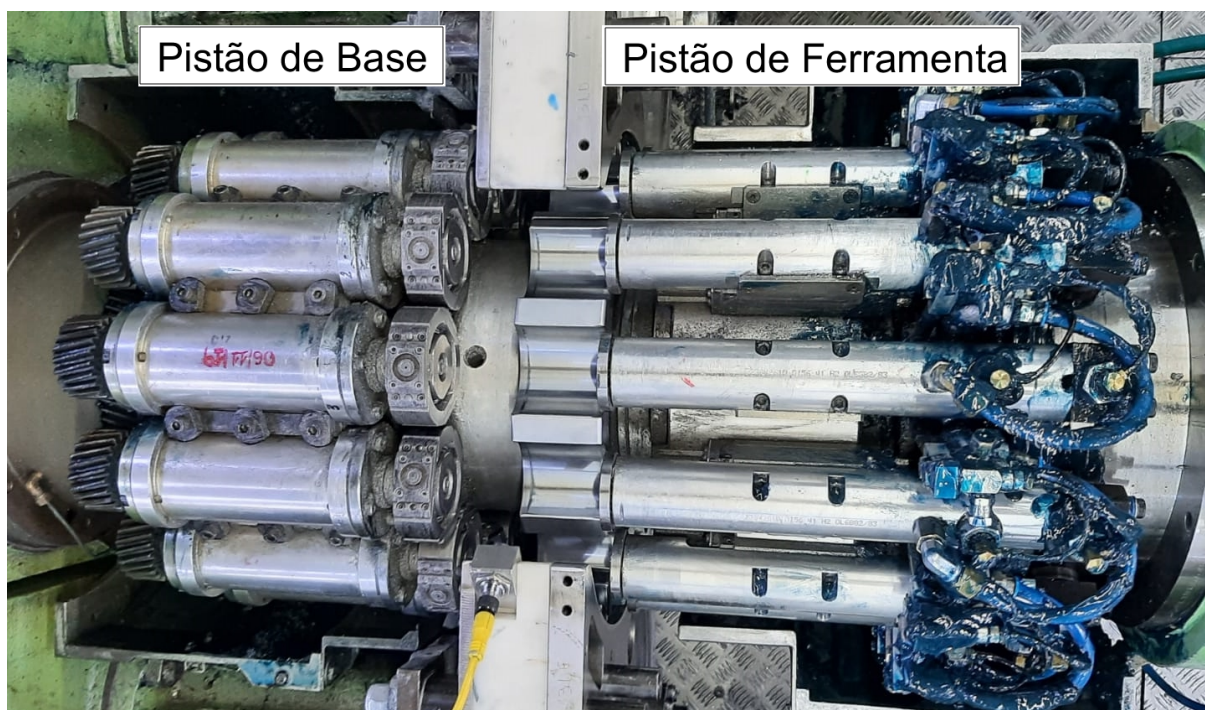


Figura 12 – Representação da localização dos pistões de base e de ferramenta. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

O pistão de base é o responsável por empurrar a lata em direção ao pistão de ferramenta. Primeiramente, a lata é inserida e posicionada em uma roda estrela, definida como *Starwheel* da estação, posicionada na frente dos pistões de base da torre. Após o assento da lata na *Starwheel*, é acionado o movimento da haste do pistão de base que flui por dentro da camisa do pistão e empurra a lata em direção às ferramentas.

O pistão de ferramenta é o pistão onde estão localizadas todas as ferramentas necessárias para a conformação do pescoço da lata de alumínio. Este pistão também possui uma haste no interior de sua camisa que movimenta o bloco guia (*Guide Block*). O bloco guia tem a função de guiar a lata empurrada pelo pistão de base até a região de conformação, evitando um mau encaixe da lata com a ferramenta. A ferramenta responsável pela conformação do pescoço, denominada *Necking Die*, é constituída por material cerâmico e fica fixada na camisa do pistão de ferramenta.

As duas ferramentas, o bloco guia e o *Necking Die*, são centralizadas e alinhadas de maneira a garantir um espaçamento específico entre elas. Este espaçamento é equivalente à espessura da parede da lata, com as tintas e vernizes já aplicados, e uma pequena folga. A figura 13 apresenta as duas ferramentas centralizadas e o espaçamento necessário para a entrada da lata no processo de conformação do pescoço.



Figura 13 – Ferramentas de conformação do pescoço, *Necking Die* e Bloco guia. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Dessa maneira, após receber a lata da *Waxer*, a haste do pistão de base empurra a lata no sentido da ferramenta e a haste do pistão de ferramenta empurra o bloco guia na direção da lata. Neste processo, a lata é conduzida até o bloco guia, que a estabiliza até que o *Necking Die* seja alcançado. À medida que a lata encontra a ferramenta de formação de pescoço, a haste do pistão de ferramenta retrai o bloco guia e a parede da lata é defletida para dentro do espaçamento, entrando em contato direto com o diâmetro externo do bloco guia.

Após a haste do pistão de ferramenta recuar totalmente, trazendo o bloco guia para dentro do *Necking Die*, a haste do pistão de base continuará por mais um período empurrando a lata no sentido da ferramenta, processo que permitirá a formação do pescoço. Ao finalizar a moldagem do pescoço, a haste do pistão de base irá recuar e a haste do pistão de ferramenta irá avançar, direcionando a lata para o assento da *Starwheel* retornando à posição inicial do processo. A figura 14 representa o processo de conformação da lata no espaçamento entre o bloco guia e o *Necking Die*.

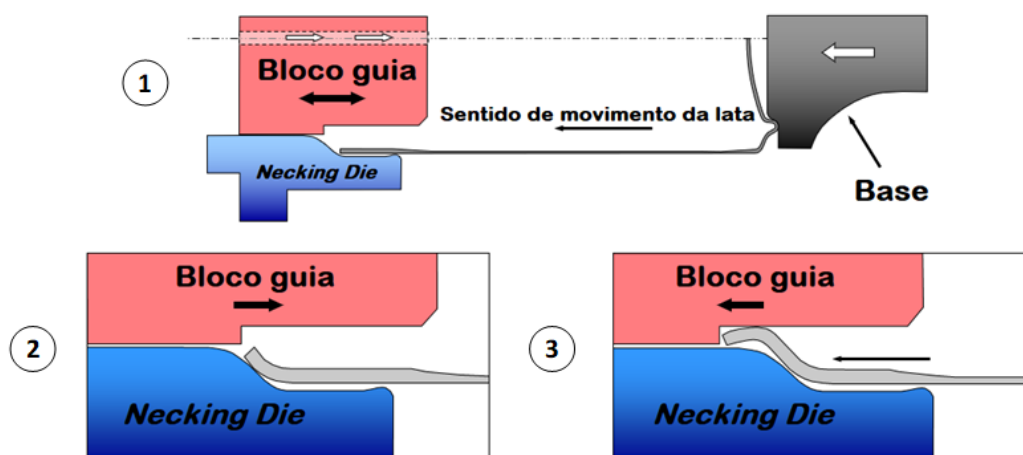


Figura 14 – Processo de conformação do pescoço da lata. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Com a finalização do processo de conformação da primeira estação, as latas conformadas são conduzidas a uma torre de transferência, que, em seguida, as conduz para as seguintes estações de conformação. As torres de transferência têm a função de transferir a lata com estabilidade de uma estação para outra e, para que isso seja possível, um manifold distribui uma pressão de vácuo na estrela de transferência no momento em que as latas são conduzidas para as próximas estações. O layout de montagem e operação das estações de conformação e das torres de transferência pode ser observado na figura 15.

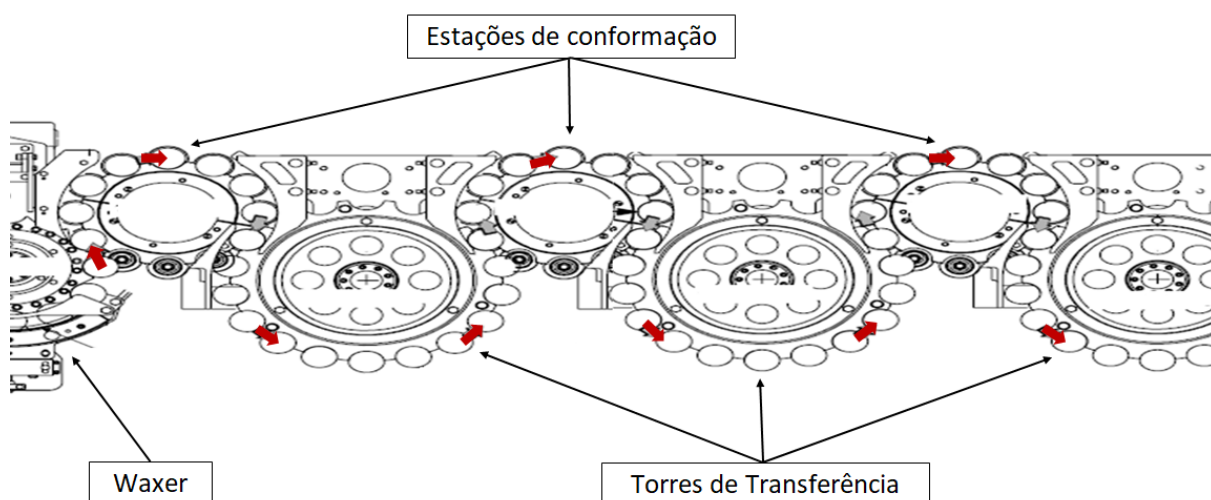


Figura 15 – Layout de montagem e operação do equipamento. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

O processo de formação do pescoço nas outras onze estações de conformação segue o mesmo padrão de operação explicado anteriormente, variando apenas o local onde a dobra é realizada. A cada estação de conformação, a dobra é realizada acima da dobra anterior, diminuindo então o diâmetro da boca da lata.

3.3.1.2 Estação de flangeamento

Posterior à conformação do pescoço, é necessário ainda conformar o flange da lata. O flange da lata é o local que permite a fixação da tampa com o corpo da lata de alumínio. O processo de formação do flange se assemelha ao processo realizado nas estações de conformação, porém, a ferramenta utilizada para conformar o flange da lata é denominada cabeça de flangeamento.

Conforme as latas são posicionadas à frente dos pistões de base, as hastes dos pistões são acionadas e empurram a lata até alcançar o interior da ferramenta da cabeça de

flangeamento. A cabeça de flangeamento é rotacionada e a lata é gradualmente pressionada ao encontro dos roletes de rotação livre, que formam o flange da lata voltado para o sentido contrário ao centro da lata. As etapas do processo de geração do flange são evidenciadas na figura 16

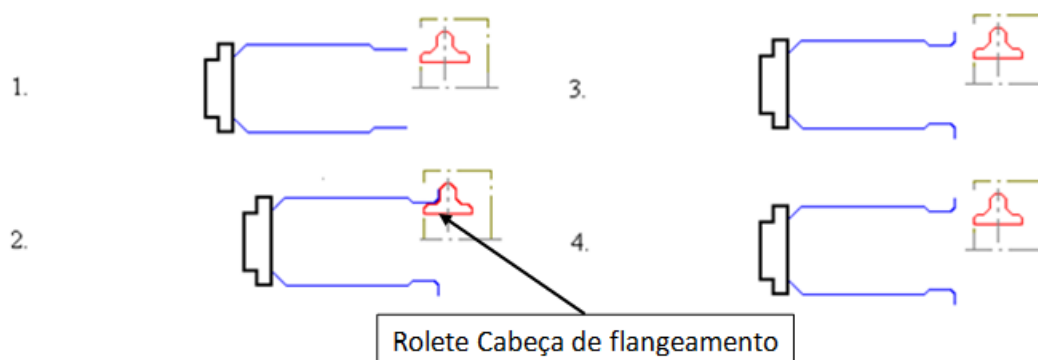


Figura 16 – Processo de conformação do flange da lata. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

3.3.1.3 Reconformação do fundo da lata

O objetivo de reconformar o fundo da lata é o de aliviar a angulação do escareado da lata, gerando uma maior resistência neste local e diminuindo o risco de abaulamento. Nesta estação, ao contrário das anteriores, os pistões de base e os pistões de ferramenta estão em posições contrárias. Portanto, o local da boca da lata é apoiado em uma base de borracha e o fundo é reconformado pela ferramenta. A estação em que ocorre este processo de reconformação do fundo da lata é conhecida como estação reformer.

O processo se inicia ao receber a lata da transferência e ao posicioná-la na estação de base reformer. A lata é, então, empurrada no sentido do pistão de ferramenta, até o fundo da lata posicionar-se no domo receptáculo. As ferramentas utilizadas para a conformação do fundo da lata são o domo receptáculo, que é fixado na camisa do pistão de ferramenta, e o rolo reformador, que fica fixo na haste do pistão por um braço articulado. Enquanto a lata é posicionada no domo receptáculo, uma pressão de ar é inserida na lata para aumentar a resistência. Em seguida, a chamada conformação do groove é realizada através do movimento de rotação do rolo reformador. A conformação do groove é definida como a conformação de um diâmetro no fundo da lata para aumentar a resistência ao abaulamento. A figura 17 a seguir representa o processo de reconformação do fundo da lata, também conhecido como processo de conformação do groove.

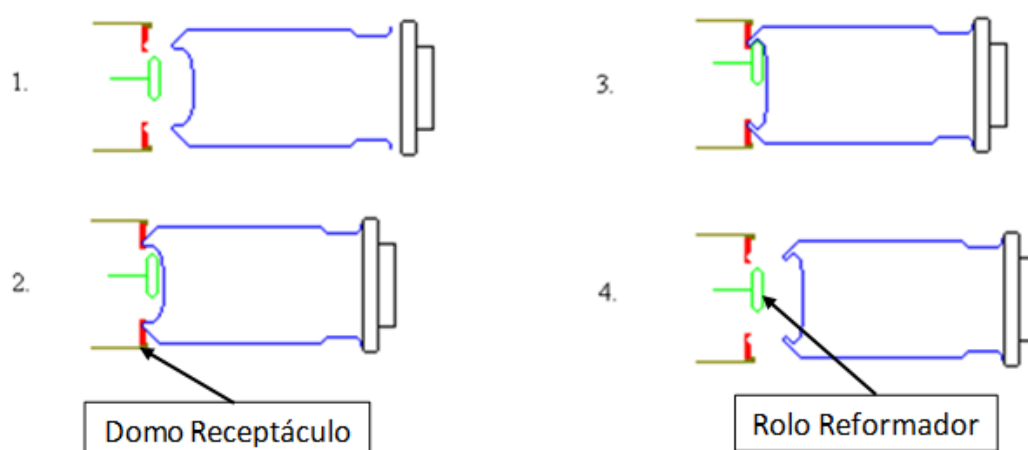


Figura 17 – Processo de reconformação do fundo da lata. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

3.3.2 Atual estratégia de manutenção do equipamento

O *Necker* é considerado um equipamento de alta criticidade para a linha de produção, pois trata-se de um maquinário único que desempenha a função de conformação do pescoço da lata. Ou seja, caso ocorra uma falha funcional neste equipamento, toda a produção será interrompida até que o reparo necessário seja executado. Por se tratar de um equipamento de alta criticidade, seu desempenho e sua disponibilidade de operação são parâmetros de grande interesse para o alcance de um resultado positivo da produção.

A versão do equipamento *Necker CMB 3400* foi instalada na linha de produção da fabricante de latas no ano de 2014, com o intuito de substituir o antigo equipamento com menor capacidade produtiva. Pela falta de entendimento sobre o modo de operação da máquina, a estratégia de manutenção utilizada no equipamento, entre os anos de 2014 e 2018, foram majoritariamente reativas. Neste período, a equipe de manutenção passou a observar e registrar o tempo de vida útil dos componentes do maquinário.

Com o intuito de aumentar a entrega da produção total, foram realizadas algumas adaptações no equipamento *Necker* para aumentar sua velocidade de produção e, conseqüentemente, aumentar seu pacote de entrega. Além dessas adaptações físicas, foi necessário implementar uma nova estratégia de manutenção para garantir que o aumento da velocidade de operação do equipamento não resultasse em um aumento do seu número de falhas funcionais e diminuição de sua disponibilidade. A nova estratégia se resumia na priorização da execução de atividades preventivas e na redução da execução das atividades corretivas. A implementação da nova estratégia de manutenção foi realizada no ano de 2020.

Em relação aos indicadores de performance da linha de produção, a implementação

da nova estratégia de manutenção foi bem sucedida. Ao utilizar como base os dados de velocidade média e disponibilidade do equipamento, dos anos de 2017 a 2021, é possível observar que a ascensão da velocidade média do equipamento não se refletiu na diminuição de sua disponibilidade. Pelo contrário, através das figuras 18 e 19, é possível observar o aumento da linha de tendência tanto da velocidade média quanto da disponibilidade do equipamento. Deve-se ressaltar que os dados de indicadores de performance fornecidos, referentes ao ano de 2021, ainda estão inconclusivos.

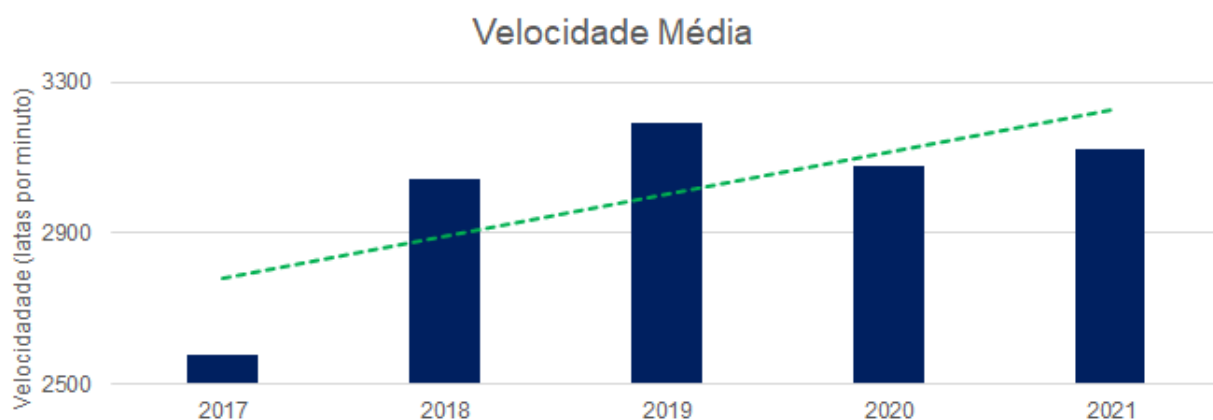


Figura 18 – Evolução da velocidade média do equipamento entre o período de 2017 e 2021. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

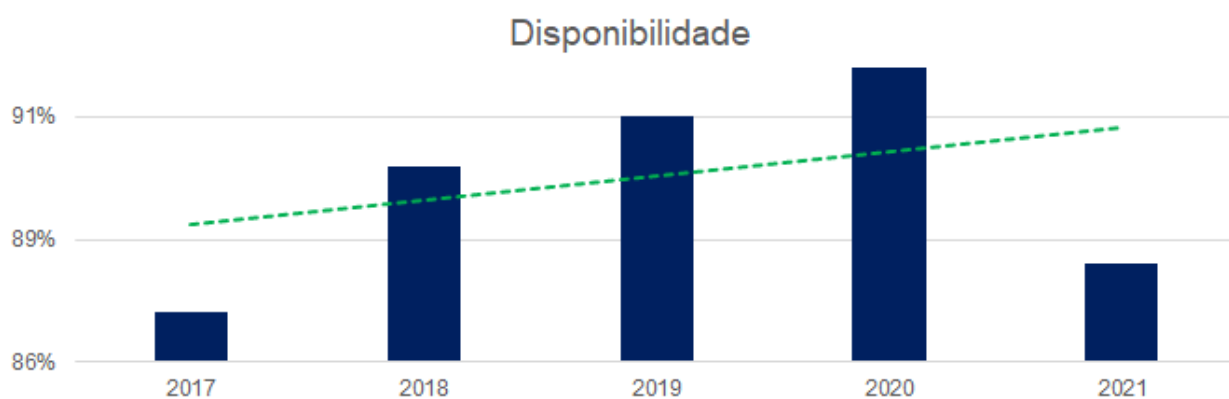


Figura 19 – Evolução da disponibilidade do equipamento entre o período de 2017 e 2021. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Desde a implementação da estratégia de manutenção, a qual prioriza a realização das atividades preventivas em relação às corretivas, é utilizado como parâmetro de desempenho da equipe de manutenção o indicador representado na equação 3.13. Observa-se também na figura 20, o resultado da evolução do indicador para o equipamento *Necker*, desde o período de implementação da estratégia de manutenção.

$$\text{Indicador de manutenção} = \frac{\text{Número de Preventivas executadas}}{\text{Número de Corretivas executadas}} \quad (3.13)$$

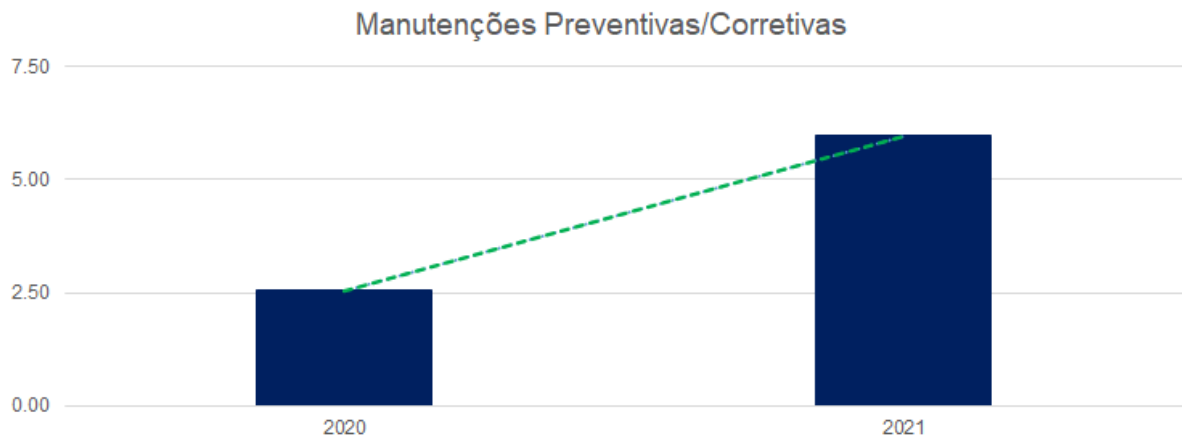


Figura 20 – Indicador de manutenção: Preventivas x Corretivas. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Ao analisar a figura 20, observa-se que o indicador de manutenção para o *Necker* evoluiu em média de 2,5, no ano de 2020, para 6, no ano de 2021. Dessa maneira, é possível comprovar que a estratégia de manutenção mais utilizada no equipamento, atualmente, é a estratégia de manutenção preventiva.

A máquina responsável pela formação do pescoço da lata é considerada um equipamento complexo que executa um processo muito específico e de alta precisão. Por esse motivo, os componentes do equipamento, como por exemplo os pistões de base, os pistões de ferramenta e as ferramentas de conformação são itens de alto custo de aquisição. A execução de trocas preventivas dos componentes do equipamento são proveitosas no sentido de garantir o bom funcionamento do maquinário, mas, também, impactam negativamente o custo da manutenção. Portanto, a fim de utilizar o máximo do tempo da vida útil do componente e ainda garantir a confiabilidade do equipamento, a tendência é que a estratégia de manutenção do equipamento seja modificada da predominância na execução de manutenções preventivas para preditivas.

Seguindo a tendência de implementação da manutenção preditiva, algumas técnicas já são utilizadas no equipamento em intervalos de tempo definidos. As técnicas preditivas são realizadas por uma empresa terceirizada, que executa o monitoramento de vibração e temperatura de alguns componentes. A técnica de acompanhamento da vibração é realizada mensalmente e acompanha apenas os níveis de vibração dos três motores e redutores de acionamento das estações de conformação, flangeamento e reformer. A técnica de acompanhamento da temperatura, realizada com uma periodicidade de três

meses, é executada através da utilização de câmera termográfica nos painéis elétricos do equipamento, não sendo monitorado quaisquer outros pontos críticos determinados.

3.3.3 Implementação da Preditiva *On-line*

O novo sistema de monitoramento do *Necker CMB3400* irá fornecer dados em tempo real acerca dos níveis de vibração e temperatura dos componentes de maior criticidade do equipamento. O funcionamento do sistema consiste na conexão dos sensores de análise de vibração e dos sensores de medição de temperatura com uma eletrônica de diagnóstico externa, que transfere os sinais detectados pelos sensores para um software de monitoramento dos parâmetros.

O sensor de vibração utilizado para o monitoramento do equipamento será o sensor capacitivo da IFM denominado VSA001, que possui uma faixa de frequência de medição de 1 a 6000 Hz e sensibilidade de $142 \mu A/g$. Para a medição da temperatura dos pontos definidos, será utilizado também um componente da IFM denominado TS2229, que é um sensor de cabo de temperatura com sonda de contato, com um alcance de medição de $-40^{\circ}C$ a $90^{\circ}C$.

A eletrônica de diagnóstico aplicada no novo sistema será a VSE002 da IFM, um dispositivo que possui duas entradas analógicas e quatro entradas dinâmicas. Nas entradas analógicas pode ser conectado um sinal de pulso ou de corrente analógica. Entretanto, nas entradas dinâmicas também é possível conectar um sinal de corrente analógica para monitorar no máximo quatro variáveis de processo. Portanto, a eletrônica de diagnóstico VSE002 permite a conexão de até quatro sensores de vibração do tipo VSA001.

Os sinais de entrada, fornecidos pelos sensores para a eletrônica de diagnóstico, são detectados de maneira contínua e monitorados conforme os parâmetros definidos pelo software VES004. Este software é responsável por parametrizar a eletrônica de diagnóstico, através da interface Ethernet, e fornecer painéis de visualização dos dados gerados em tempo real.

A parametrização da eletrônica de diagnóstico, em relação aos sensores de vibração, é definida de acordo com a ISO10816 e com as respectivas características de operação de cada componente monitorado. À medida que são definidos os intervalos de vibração e temperatura aceitáveis para cada ponto de medição, a eletrônica VSE002 é responsável por monitorar, comunicar e alertar o software de acompanhamento caso algum dos parâmetros medidos exceda os níveis aceitáveis pré-estabelecidos. A dinâmica do funcionamento do novo sistema de monitoramento pode ser observado na figura 21 (ISO 10816, 2013).

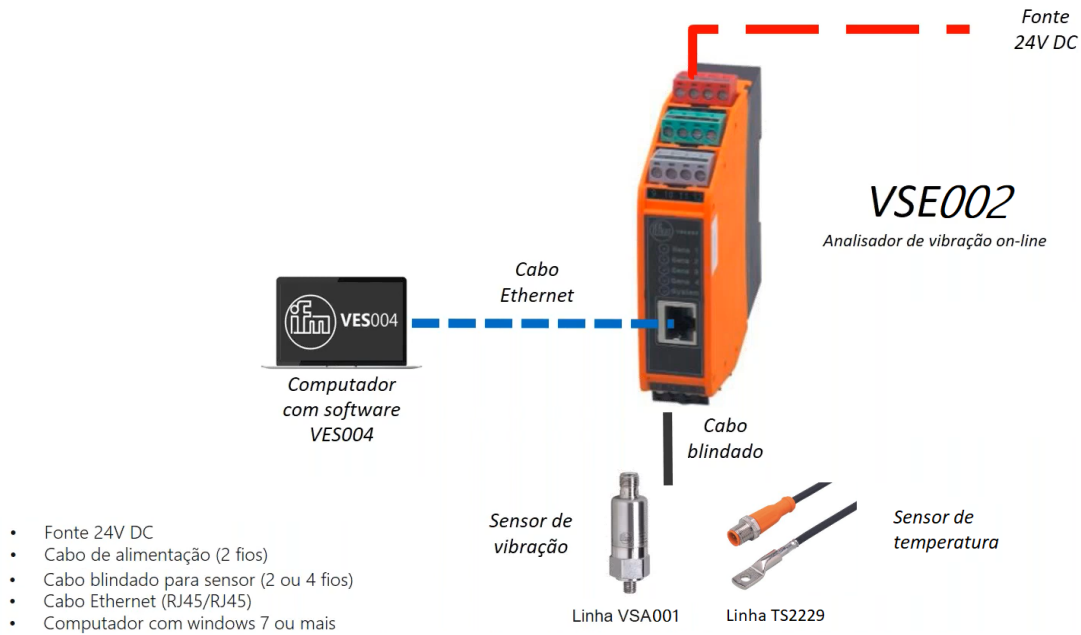


Figura 21 – Funcionamento geral do novo sistema de monitoramento. Fonte: Adaptado de IFM (2021).

3.3.3.1 Pontos definidos para a medição

Os componentes que serão monitorados no novo sistema de manutenção preditiva do equipamento *Necker* foram determinados de acordo com a criticidade da ocorrência de falha nos componentes em questão. Dessa maneira, destacam-se os critérios utilizados para a seleção dos pontos de monitoramento:

- Tempo de reparo do componente;
- Falha do componente que caracteriza a falha funcional do equipamento;
- Custo da substituição do componente.

Seguindo este critério de seleção, foram definidos 28 pontos de monitoramento do equipamento. Os pontos definidos podem ser observados na tabela 9, onde os termos “LOA” representam o lado oposto ao acionamento e “LA” o lado do acionamento.

Local de Instalação	Temperatura	Vibração
Motor de Acionamento 3	1	1
Redutor de Acionamento 3	1	1
Motor de Acionamento 4	1	1
Redutor de Acionamento 4	1	1
Motor de Acionamento 5	1	1
Redutor de Acionamento 5	1	1
Eixo da torre da Estação intermediária LA	1	1
Eixo da torre da Estação intermediária LOA	1	1
Eixo da torre principal Estação 08 LA	1	1
Eixo da torre principal Estação 08 LOA	1	1
Eixo da torre principal Estação 09 LA	1	1
Eixo da torre principal Estação 09 LOA	1	1
Eixo da torre principal Estação 10 LA	1	1
Eixo da torre principal Estação 10 LOA	1	1
Eixo da torre principal Estação 11 LA	1	1
Eixo da torre principal Estação 11 LOA	1	1
Eixo da torre principal Estação 12 LA	1	1
Eixo da torre principal Estação 12 LOA	1	1
Eixo da torre principal Estação Flangeamento LA	1	1
Eixo da torre principal Estação Flangeamento LOA	1	1
Eixo da torre principal Estação Reformer LA	1	1
Eixo da torre principal Estação Reformer LOA	1	1
Eixo principal 01 Alimentação Waxer	-	1
Eixo principal 02 Waxer	-	1
Eixo principal 03 Saída Waxer	1	1
Conjunto Bomba Vácuo de Transferência	1	1
Conjunto Bomba Saída Reformer	1	1
Conjunto Bomba de ar Single filer	1	1
Total de sensores	26	28

Tabela 9 – Definição dos pontos que serão monitorados no novo sistema de monitoramento. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

O acompanhamento dos níveis de vibração e temperatura das estações de conformação, flangeamento e reformer são importantes para detectar falhas nos pistões de ferramenta e base, como, por exemplo, a falha de lubrificação e de travamentos dos pistões. As falhas no acionamento dos pistões geram diversos defeitos na lata e, por esse motivo, prejudicam diretamente a qualidade do produto final. Como citado anteriormente, o equipamento utilizado como objeto de estudo do presente trabalho atualmente produz um formato de embalagem de alumínio que exige a utilização de apenas cinco estações de conformação. Por esse motivo, as únicas estações de conformação monitoradas serão as estações de 8 a 12. Os motores e redutores de acionamento são os responsáveis pelo acionamento de todas as estações de conformação, estação de flangeamento, estação de reformer, estação intermediária e Waxer. Portanto, pelo fato dos conjuntos motores/redutores se-

rem os responsáveis por toda a parte de acionamento do equipamento, a falha de alguns destes componentes traria, como consequência direta, a falha funcional do equipamento. A relação de acionamento de cada um dos conjuntos motores/redutores pode ser observado na tabela 8.

Motor/Redutor 03	Motor/Redutor 04	Motor/Redutor 05
Estação de conformação 08	Estação de conformação 11	Estação de flangeamento
Estação de conformação 09	Estação de conformação 12	Estação de reformer
Estação de conformação 10		

Tabela 10 – Relação de acionamento dos conjuntos Motores/Redutores. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Outros pontos que serão monitorados incluem a bomba de ar do *Single filer*, que é responsável por garantir a entrada de latas no equipamento *Necker* e a bomba de vácuo de transferência, que é a responsável por garantir a movimentação estável da transferência das latas de estação para estação.

Assim, além de fornecer os dados de medição em tempo real, a implementação do novo sistema de manutenção preditiva irá monitorar a vibração de 22 pontos a mais do que a manutenção preditiva atualmente utilizada no equipamento, além de também captar os dados da variação de temperatura destes pontos considerados de alta criticidade.

Para melhor demonstrar o funcionamento do novo sistema de manutenção preditiva baseado nos princípios da indústria 4.0, foi desenvolvido um diagrama que ilustra todos os pontos que serão monitorados pelo novo sistema e, quais as respectivas eletrônicas digitais serão responsáveis pelo armazenamento e parametrização de cada sensor.

O diagrama de funcionamento do novo sistema de manutenção preditiva com o funcionamento das Eletrônicas de diagnóstico e a localização dos sensores de medição de vibração e temperatura no equipamento *Necker CMB* pode ser observado na seção "Anexos - Segundo Anexo".

3.3.4 Objeto de estudo: Redutor de acionamento

O redutor do acionamento das estações de flangeamento e reformer será utilizado como objeto de estudo para avaliar seu tempo de vida útil, segundo as diferentes estratégias de manutenção preventivas e preditivas. Este subequipamento foi determinado como objeto da análise pela disponibilidade de dados acerca do histórico de trocas, e por se tratar de um dos pontos monitorados mensalmente pela técnica preditiva. Dessa maneira, é possível realizar uma análise comparativa das estratégias de manutenção, de modo a definir qual estratégia é a mais adequada para a companhia. A tabela 11 apresenta o histórico das últimas três trocas do subequipamento.

Histórico de Substituição03/02/2020 | 02/09/2020 | 27/09/2021

Tabela 11 – Histórico de substituição do redutor de acionamento. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Atualmente, a manutenção parcial ou a substituição do redutor ocorre após a verificação de alguma não conformidade nos níveis de vibração do redutor, que são obtidos na análise preditiva mensal. Entretanto, essa janela de inspeção mensal é considerada extensa para a verificação das condições de operação do subequipamento, possibilitando, assim, um grande risco de ocorrência da falha neste intervalo. A ocorrência da falha funcional, sem um planejamento prévio da execução da manutenção corretiva, acarreta o aumento no tempo de reparo do equipamento e, conseqüentemente, na diminuição de sua disponibilidade.

Quando se torna necessário realizar o reparo do redutor, geralmente devido ao desgaste dos componentes, o equipamento é encaminhado ao fabricante para que o reparo completo do equipamento seja realizado. A empresa responsável pelo reparo apresenta um relatório de análise técnica dos danos causados no equipamento devido à falha ocorrida. A figura 22 apresenta os danos gerados no eixo pinhão e no pinhão após a falha funcional do redutor de acionamento 05.

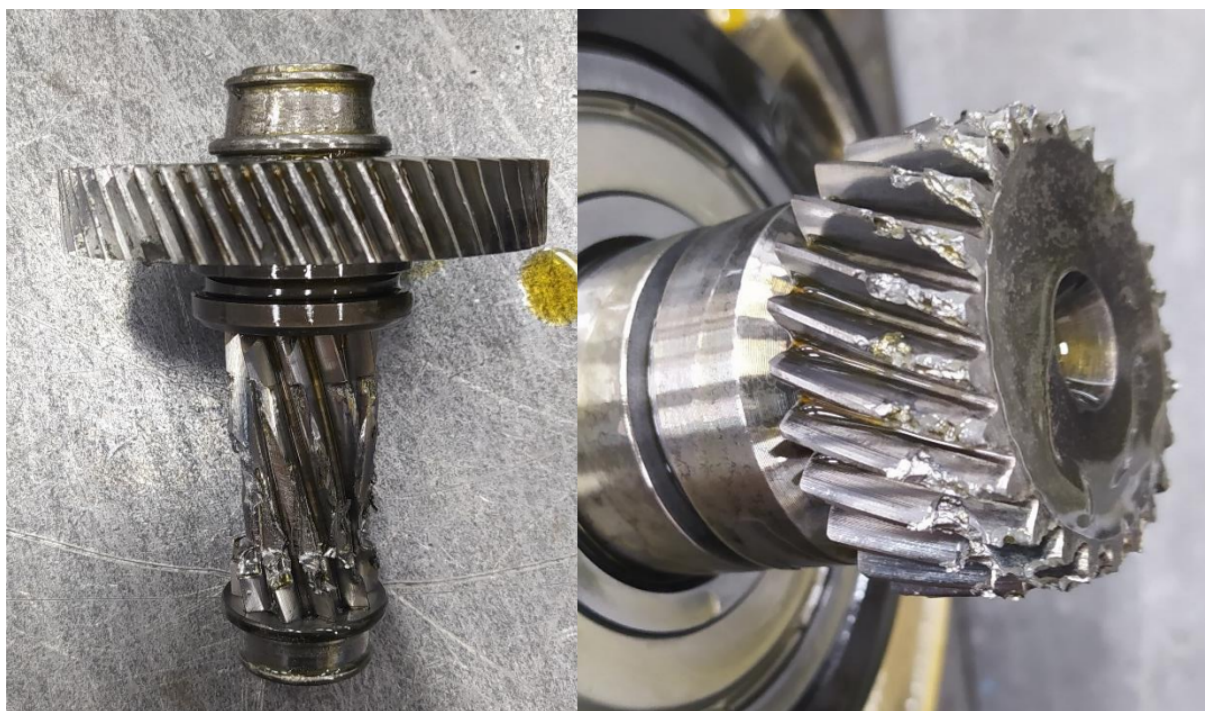


Figura 22 – Relatório de análise técnica fornecido pela fabricante, falha no eixo pinhão e pinhão do redutor. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Com a implementação do novo sistema de manutenção preditiva, será possível

acompanhar o modo de operação do redutor em tempo real e, portanto, diagnosticar rapidamente suas potenciais falhas. A detecção do risco de falha, no momento em que ainda se considera uma falha potencial, possibilita a realização de todo o planejamento da manutenção, que demanda o mínimo de tempo de máquina parada. A figura 23 apresenta os sensores de monitoramento do novo sistema de manutenção preditiva instalados no redutor de acionamento 05.

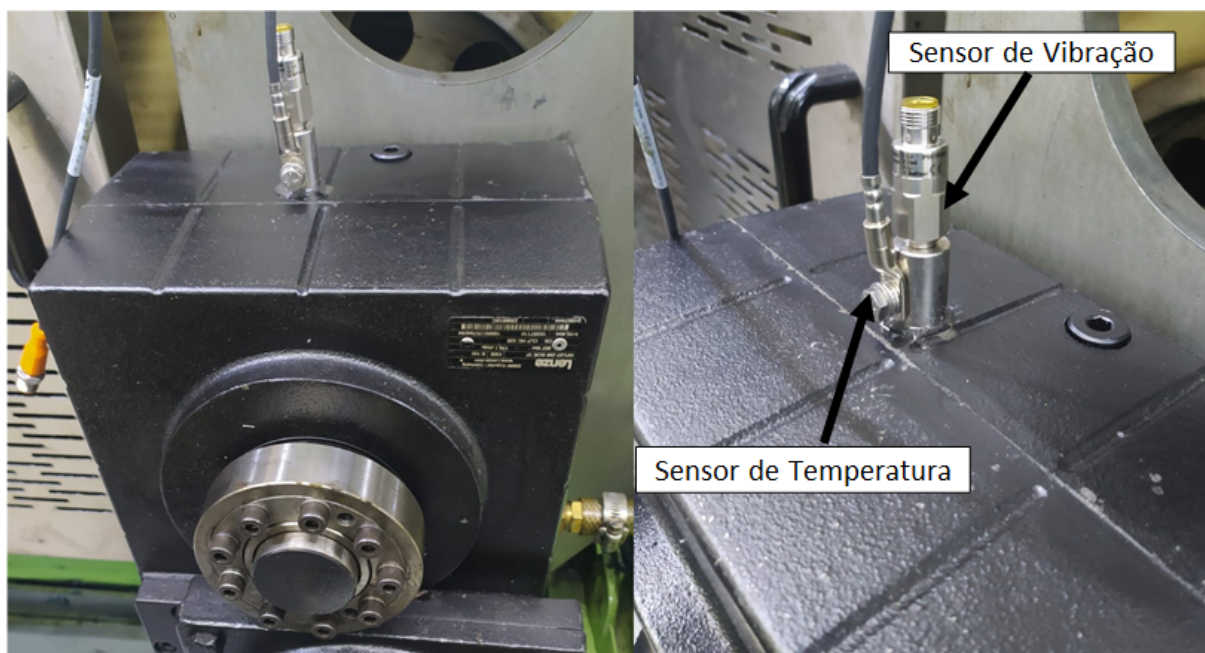


Figura 23 – Instalação dos sensores do novo sistema de monitoramento. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

3.4 Ferramentas computacionais

O redutor de acionamento das estações de flangeamento e de reformer será utilizado como objeto de estudo para a análise das suas falhas, do seu tempo de vida útil e da sua previsão de ocorrência de falha. Serão utilizados os dados fornecidos pelo sensor de detecção de vibração mecânica para estimar o tempo restante de vida útil do redutor devido ao seu modo de operação. O sensor de vibração instalado no redutor irá transmitir o sinal para a eletrônica de diagnóstico, e esta irá disponibilizar os dados obtidos no software gratuito da empresa IFM, o VES004.

O novo sistema de controle preditivo se encontra na etapa de instalação, ou seja, os dados referentes à operação do redutor ainda não foram coletados. Entretanto, para apresentar a interface do software VES004, a figura 24 apresenta os dados referentes à vibração da estação de conformação 11 do equipamento *Necker*, fornecidos por outra unidade da fabricante de latas, que utiliza o mesmo sistema de controle preditivo.

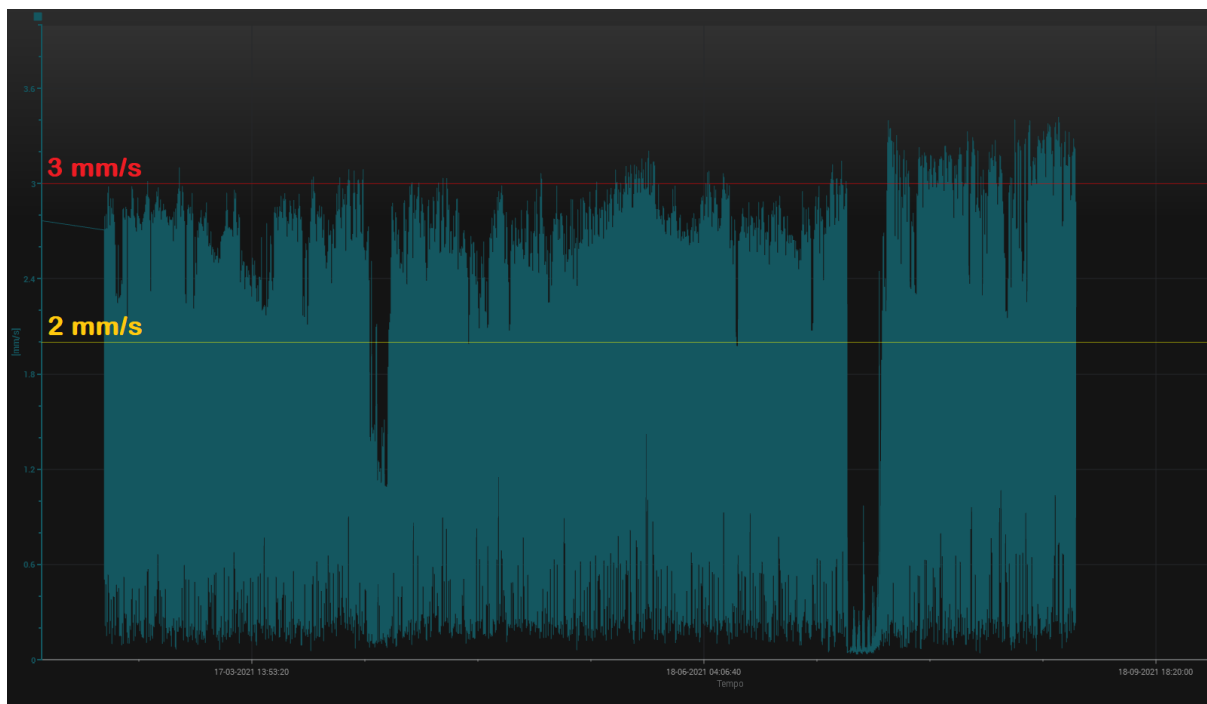


Figura 24 – Interface do Software VES004 exibindo os dados de vibração da Estação de Conformação. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

A ferramenta VES004 é utilizada para o processamento e a visualização dos dados, sendo possível obter o diagnóstico da causa da falha através das características dos sinais de vibração que são coletados dos sensores de vibração. Ou seja, o software fornece o histórico da operação, a situação atual da operação e os respectivos modos de falha identificados.

Para realizar a análise de tempo até a falha funcional do componente, ou a previsão do modo de operação do aparelho após determinado período, será utilizada uma ferramenta (*Toolbox*) do software *Matlab*.

3.4.1 Ferramenta de manutenção preditiva do *Matlab*

A ferramenta de manutenção preditiva, ou *Predictive Maintenance Toolbox* do software *Matlab*, será utilizada para analisar os dados coletados dos sensores de vibração do redutor de acionamento 05. Essa ferramenta fornece meios para realizar o tratamento dos dados, a projeção de indicadores de condição e a estimativa do tempo de vida útil restante de uma máquina. Também é fornecido um aplicativo interativo que possibilita a extração das características do sistema analisado, utilizando técnicas baseadas em modelos e dados.

Para determinar a estimativa do tempo de vida útil restante do equipamento (*Remaining Useful Life* - RUL), é possível aplicar, no ambiente da ferramenta, três diferentes métodos. O método da similaridade, para a determinação do RUL, exige desde os da-

dos do equipamento em operação até os dados do equipamento em estado de falha. Já o método de sobrevivência exige os dados do tempo de vida do equipamento relacionados aos eventos de troca de componentes e de identificação de falhas. O modelo baseado em tendência necessita dos dados do limite de falha conhecido para a determinação do RUL. Para o caso em que não são coletados os dados de falha do equipamento, é possível gerar dados de falha de simulação através da obtenção de modelos do *Simulink*, que representem a máquina em condições de falha. A figura 25 é um exemplo da estimativa do RUL utilizando a ferramenta de manutenção preditiva.

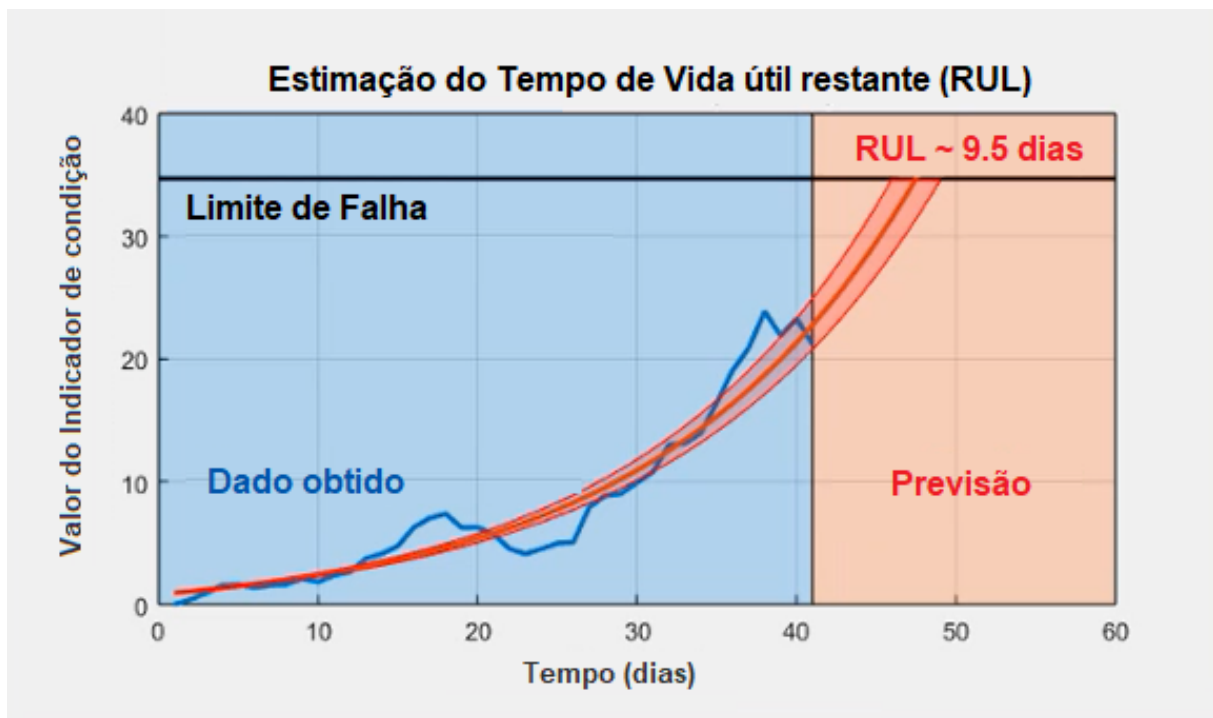


Figura 25 – Exemplo da estimativa do RUL utilizando a *Predictive Maintenance Toolbox*.
Fonte: Adaptado de MathWorks (2018).

Dessa maneira, a determinação do método para a estimativa do tempo de vida útil restante do componente dependerá das informações que serão coletadas no período em que o equipamento será monitorado.

4 Resultados

4.1 Estatística Manutenção centrada em confiabilidade

4.1.1 Determinação da distribuição

A aplicação da estatística da manutenção centrada em confiabilidade para o estudo de caso foi obtido através de uma amostra dos dados de falha do redutor de acionamento. A tabela 12 apresenta a amostra utilizada no estudo, que possui onze intervalos de evidências de falha, representadas pela unidade de tempo em dias.

Amostra	Tempo de falha (dias)
	181
	212
	236
	327
	336
	365
	379
	383
	407
	453
	462

Tabela 12 – Amostra do tempo de falha do redutor de acionamento 5. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

O ajuste dos dados da amostra e a determinação da distribuição de probabilidade mais adequada para o estudo foram obtidos por meio de duas estratégias. A primeira estratégia utilizada foi a gráfica, com base no histograma de frequência dos dados de falha. A estratégia analítica também foi utilizada para a determinação da distribuição de probabilidade, por meio da aplicação de testes de aderência.

O software *Matlab* foi utilizado para a análise gráfica do histograma empírico dos dados de falha e das diferentes distribuições de densidade de probabilidade obtidas dos dados amostrais. A determinação da distribuição que melhor representa a amostra é determinada por meio da comparação da distribuição dos dados - obtida no histograma de frequência - e das diferentes distribuições de probabilidade conhecidas e tabeladas. A figura 26 representa o histograma de falhas do redutor de acionamento.

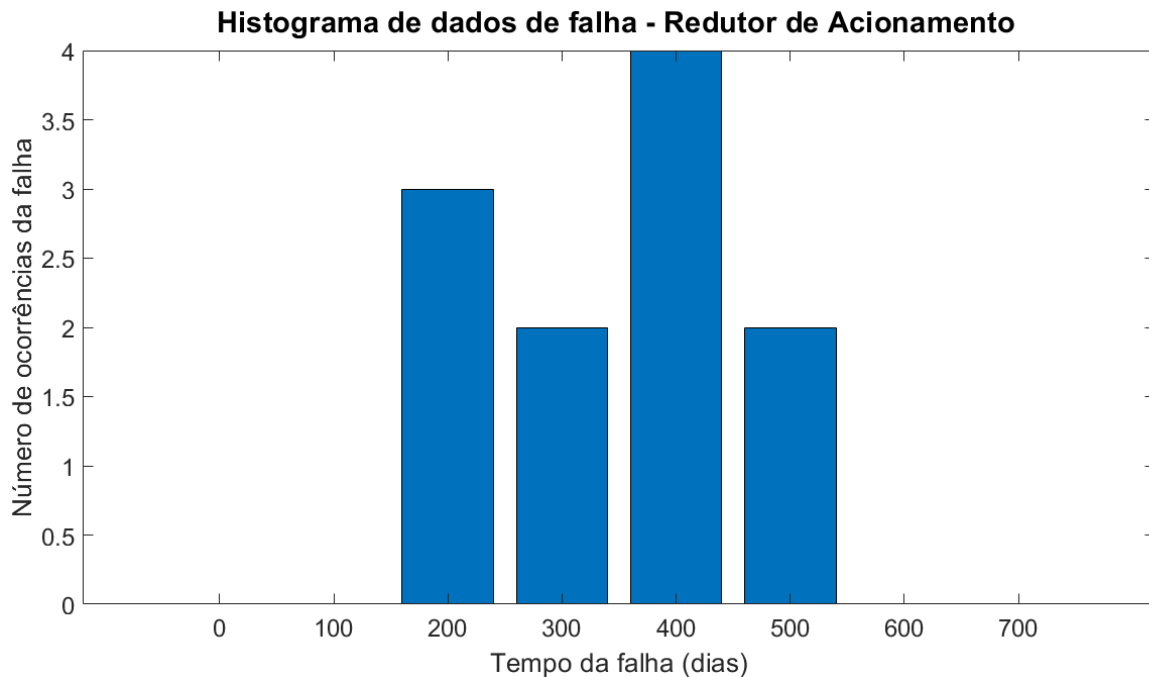


Figura 26 – Histograma dados de falha. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

As diferentes distribuições de densidade de probabilidade foram determinadas por meio das equações da tabela 4, referentes às distribuições de probabilidade Exponencial, Weibull, Gamma e Lognormal. A determinação dos parâmetros de forma, escala e localização para cada uma das quatro distribuições estudadas foi alcançada por meio da aplicação do software *Proconf* nos dados da amostra de tempos de falha. Dessa maneira, a fim de realizar a análise comparativa das distribuições de densidade de probabilidade, foram obtidos os respectivos gráficos para cada distribuição estudada. A figura reffig:distribui representa as distribuições de densidade de probabilidade para as quatro diferentes distribuições analisadas.

O processo de determinação da distribuição que melhor representa o comportamento dos tempos de falha do redutor deve ser definido ao realizar uma análise comparativa das distribuições de probabilidade e do histograma de frequência de falha da amostra. Assim, a distribuição que possuir uma curva que melhor represente o comportamento do histograma será utilizada para determinação dos indicadores de confiabilidade do redutor, como, por exemplo, o tempo médio entre falhas e o tempo até a falha. A figura 28 foi utilizada para facilitar a análise comparativa das distribuições de probabilidade junto ao histograma de frequência de falha.

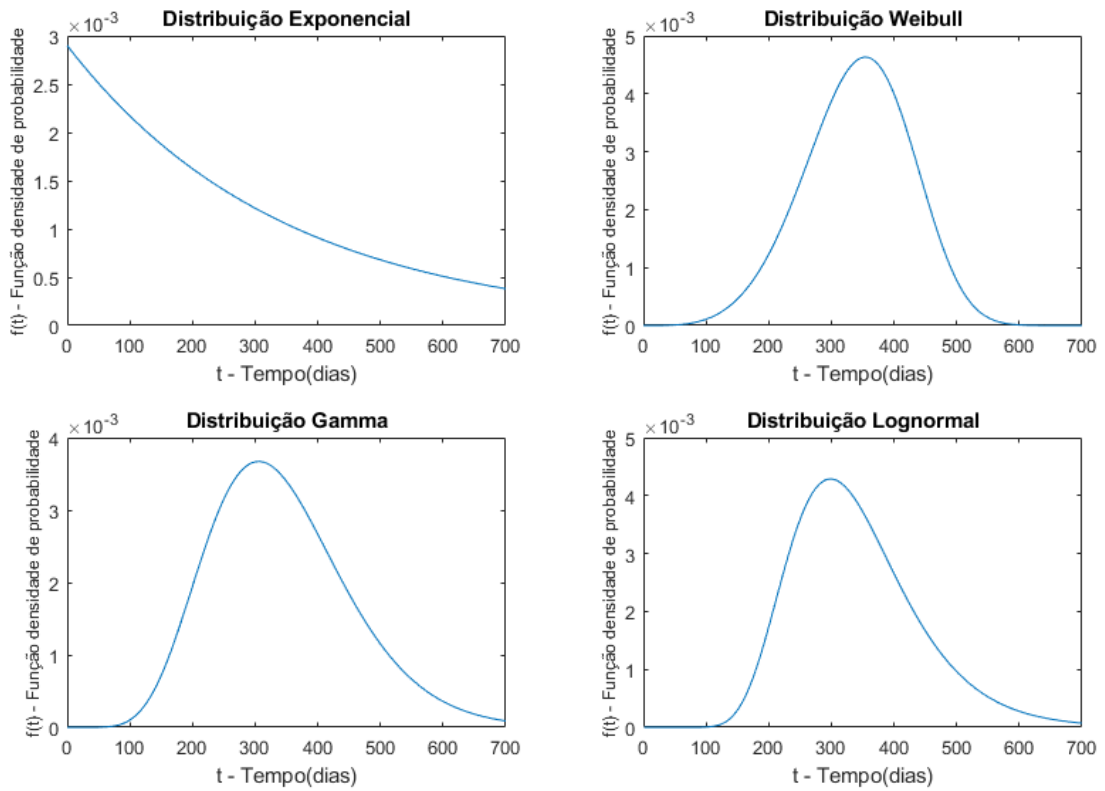


Figura 27 – Distribuições analisadas no estudo de caso. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

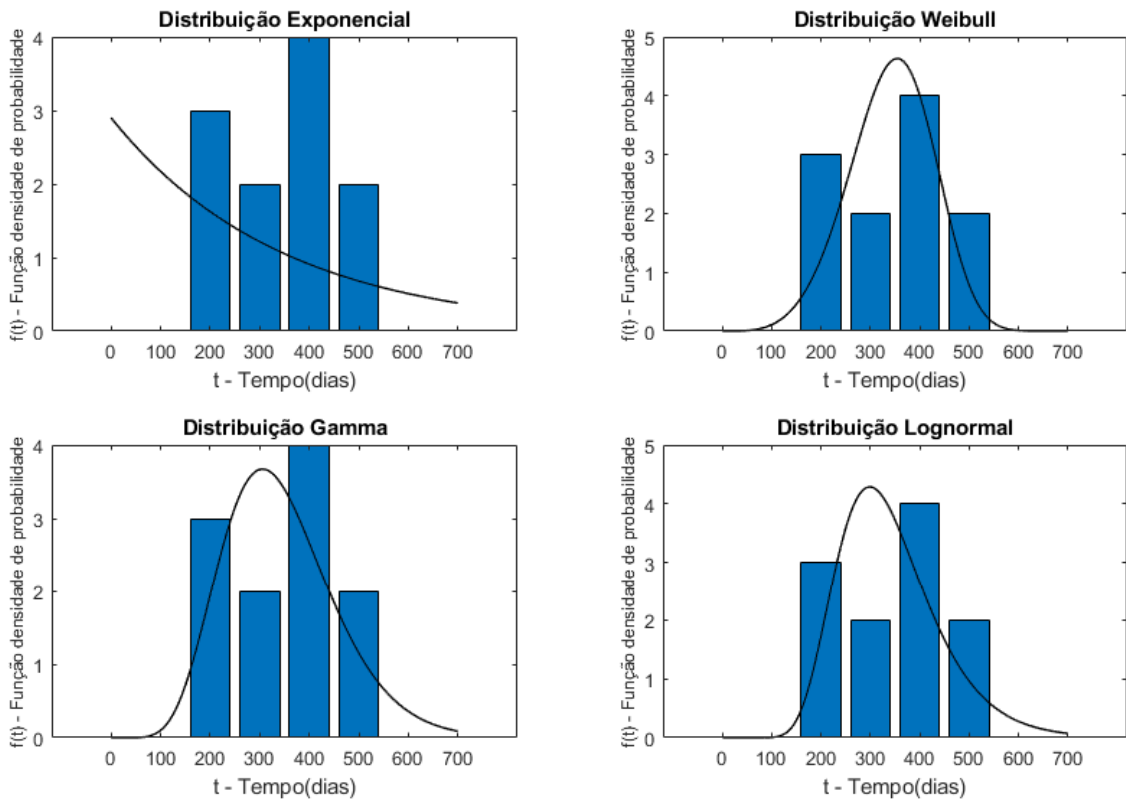


Figura 28 – Análise das distribuições aplicadas ao histograma da amostra. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Por meio da figura 28 é possível observar que as distribuições que mais se assemelham ao histograma de frequência são as distribuições de Weibull e Lognormal. A distribuição de Weibull pode ser destacada como a distribuição que possui maior abrangência ao histograma. Entretanto, essa visualização gráfica ainda não é suficiente para a determinação da distribuição que melhor representa os dados de falha. Dessa maneira, torna-se necessário utilizar a estratégia analítica de teste de aderência para realizar o ajuste de dados e definir a distribuição de probabilidade adequada para o espaço amostral.

O teste de aderência mais relevante para o espaço amostral do estudo é o teste de hipótese Kolmogorov-Smirnov, pois é o que possui resultados mais consistentes para amostras com poucos dados disponíveis. O software *Proconf* foi utilizado para gerar a tabela 13, que representa os resultados dos testes de aderência das distribuições estudadas, junto ao MTTF calculado para cada distribuição.

	Exponencial	Weibull	Gamma	Lognormal
MTTF(dias)	340.09	334.99	343.53	341.30
NS- Quiquadrado	0.0001	0.38	0.231	0.175
NS- Kolmogorov-Smirnov	0.0001	0.2114	0.1848	0.1096

Tabela 13 – MTTF e níveis de significância das diferentes distribuições. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

De acordo com a tabela 13, a distribuição que possui o melhor nível de significância nos dois testes de aderência - o teste do Quiquadrado e do Kolmogorov-Smirnov - é a distribuição de Weibull. Além disso, ao analisar os valores de tempo médio até a falha, é possível observar que a distribuição de Weibull é a que possui MTTF mais conservador, sendo também mais adequada para representar o comportamento da falha do redutor de acionamento. Dessa maneira, as duas estratégias, utilizadas para a determinação da distribuição que melhor representasse o comportamento do redutor, resultaram na aplicação da função de distribuição de Weibull, que será utilizada para determinação dos indicadores de manutenção do estudo.

4.1.2 Indicadores de Manutenção - Distribuição de Weibull

Após a determinação da função distribuição de probabilidade de Weibull como a função mais adequada para o estudo de caso, foi obtido o comportamento das curvas de função de confiabilidade $R(t)$, função densidade de probabilidade acumulada $F(t)$ e função de risco $h(t)$, utilizando-se, como referência, as equações presentes na tabela 4 para função de Weibull. Os gráficos obtidos por meio das equações de confiabilidade da função distribuição de Weibull podem ser observados na figura 29.

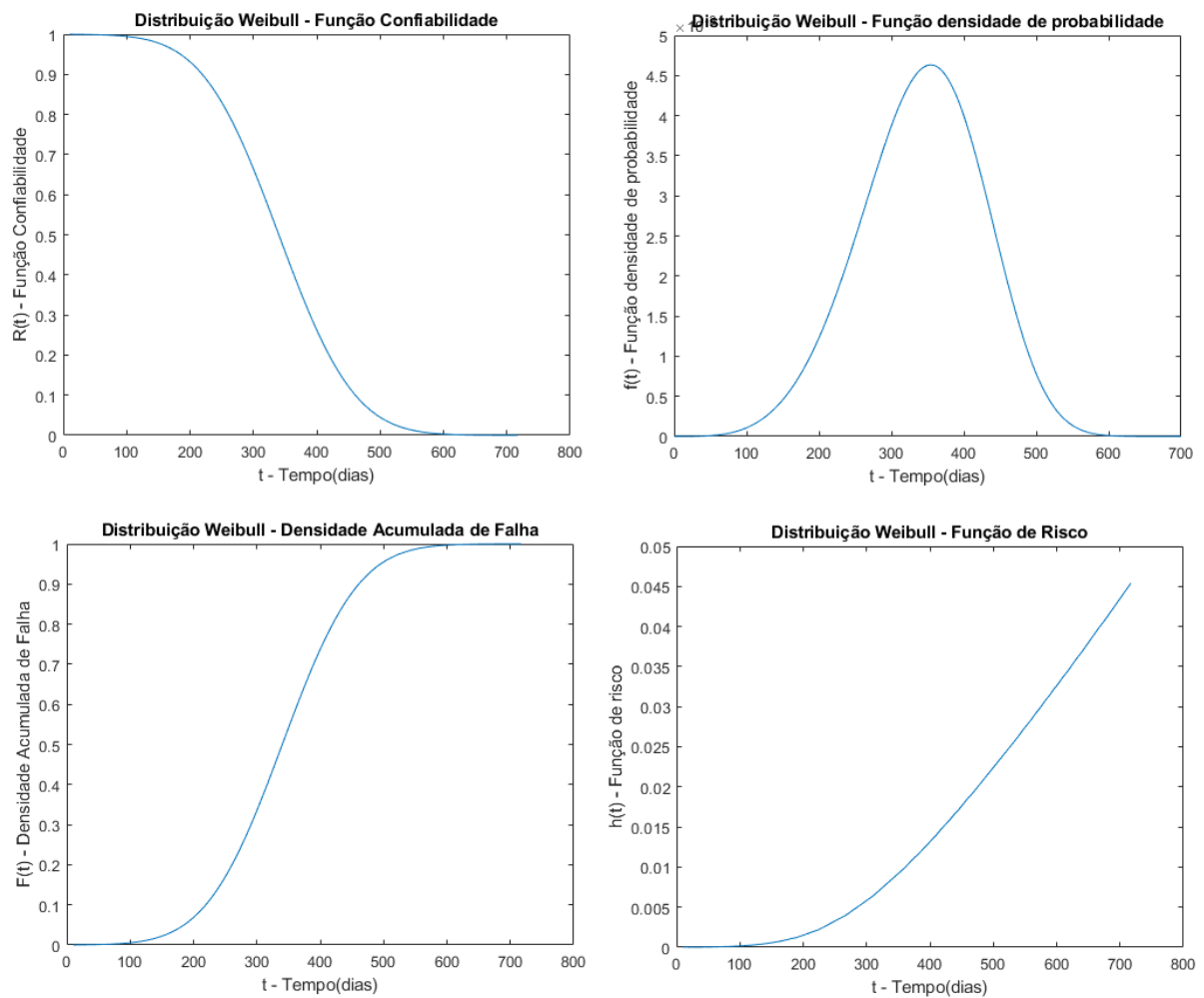


Figura 29 – Função confiabilidade, função de risco, função acumulada de falha para a distribuição de Weibull. Fonte: Autora.

A função confiabilidade $R(t)$ é a representação da diminuição da confiabilidade do componente ao longo de seu tempo de vida útil, ou seja, é a representação da probabilidade de sobrevivência de um ativo ao longo do tempo. A função de confiabilidade foi utilizada no estudo de caso para a determinação dos indicadores de manutenção de tempo até a falha (MTTF) e tempo médio entre falhas (MTBF). Além disso, utilizou-se a função de confiabilidade para a determinação dos intervalos ideais para a realização de inspeções e manutenções preventivas no equipamento de acordo com o seu tempo de falha. Dessa maneira, foi desenvolvido um plano de inspeção e de manutenção preventiva para o redutor de acionamento, considerando a confiabilidade do ativo ao longo do seu período de operação. O plano de inspeção/manutenção preventiva pode ser observado na seção 4.3 a seguir.

Por meio da figura 29, também é possível observar o comportamento da função de risco do ativo, ou seja, a maneira como a unidade envelhece ao longo do tempo. Para o caso

de estudo, é possível observar que a curva apresenta um comportamento crescente ao longo do tempo, o que caracteriza uma baixa probabilidade de falha no início de sua vida útil, e uma alta probabilidade de falha ao final do seu tempo de operação, devido principalmente à deterioração do ativo e desgaste. Dessa maneira, por conta do comportamento crescente da função de risco, é possível amenizar a intensidade de falha no envelhecimento, ao desenvolver e implementar práticas de manutenção preventiva, preditiva e de controle dos fatores do ambiente que possam causar estresse ao equipamento e intensificar a taxa de falha do produto.

Com base nos resultados obtidos na função de confiabilidade, foi possível calcular os indicadores de manutenção de interesse para o desenvolvimento do plano de manutenção preventiva sugerido para o ativo. Os resultados obtidos para os indicadores de manutenção podem ser observados na tabela 14.

Indicadores de Manutenção	Tempo (dias)
MTTF	334.99
MTBF	340.09

Tabela 14 – Indicadores de manutenção obtidos por meio dos dados da amostra. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

4.2 Desenvolvimento do FMEA

Como citado anteriormente, a ferramenta do FMEA é usualmente utilizada para implementação de programas da manutenção centrada em confiabilidade. Para melhor compreender o comportamento dos modos, efeitos e causas das falhas do equipamento em estudo, foi desenvolvido um FMEA ampliado, que contempla um conjunto dos modos e efeitos de falha juntamente com as atividades de manutenção detalhadas.

A ferramenta do FMEA foi desenvolvida por uma equipe formada por dois funcionários da manutenção mecânica, pelo supervisor de manutenção da linha de produção e pelos três funcionários da área de planejamento e controle de manutenção. Por meio de reuniões semanais, foi discutida e desenvolvida a ferramenta de modos e efeitos de falha, contemplando, ainda, um plano de ação para realização das ações recomendadas para os respectivos responsáveis.

A figura 30 representa a avaliação simplificada do FMEA, na qual podem ser observados os modos, os efeitos, as causas da falha, os controles atuais, a avaliação de risco para cada modo identificado e as ações recomendadas. O documento completo pode ser observado no capítulo Anexos.

ANÁLISE & AVALIAÇÃO DE RISCOS								OTIMIZAÇÃO	
MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO POTENCIAL DA FALHA	CAUSAS POTENCIAIS	CONTROLES ATUAIS	SEV	OCC	DET	RPN	AÇÕES RECOMENDADAS	DETALHE DA TAREFA
Quebra do conjunto de engrenagens	Vibração Excessiva	Falha de lubrificação	Checklist diário de manutenção.	5	4	3	60	Implementação da Preditiva online	Inspeção Termografia
	Temperatura Excessiva	Desalinhamento	Inspeção Preditiva mensal de Vibração.	3	2	4	24	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração
	Quebra da carcaça	Desgaste por fadiga (interferência, abrasivo ou sobrecarga)	Realizada pela fabricante. Também responsável pela manutenção dos componentes do redutor.	3	2	4	24	Solicitar Relatório de quebra e falha da empresa que realiza manutenção.	Compreender a causa da falha por fadiga, desenvolver plano de ação para redução do desgaste.
	Contaminação do óleo de lubrificação com limlâias ou sujidade	Folga inadequada entre os dentes da engrenagem	Realizada pela fabricante. Também responsável pela manutenção dos componentes do redutor.	2	1	5	10	Solicitar Relatório de quebra e falha da empresa que realiza manutenção.	Solicitar atestado de conformidade e qualidade de montagem dos componentes do redutor de acionamento.
Travamento dos eixos de entrada e/ou saída	Temperatura Excessiva	Rolamento danificado	Inspeção Preditiva mensal de Vibração.	4	4	3	48	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração
	Aumento na pressão do óleo de lubrificação	Dilatação do eixo pelo excesso de temperatura	Não controlado.	4	1	4	16	Implementação da Preditiva online	Inspeção Termografia
	Vibração Excessiva	Desalinhamento	Inspeção Preditiva mensal de Vibração.	3	2	4	24	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração
		Empenamento dos eixos	Inspeção Preditiva mensal de Vibração.	3	2	4	24	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração
Quebra dos eixos de entrada e/ou saída	Quebra dos outros conjuntos do redutor: Engrenagens, coroa, pinhão, rolemantos	Excesso de carga	Não controlado.	5	2	3	30	Medição da carga exercida.	Monitoramento da carga exercida no redutor de acionamento através do motor.
		Travamento do eixo	Inspeção Preditiva mensal de Vibração.	4	2	2	16	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração
		Desalinhamento/folga	Inspeção Preditiva mensal de Vibração.	3	2	4	24	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração
		Desgaste por fadiga	Realizada pela fabricante. Também responsável pela manutenção dos componentes do redutor.	3	2	4	24	Solicitar Relatório de quebra e falha da empresa que realiza manutenção.	Compreender a causa da falha por fadiga, desenvolver plano de ação para redução do desgaste.
		Empenamento dos eixos	Inspeção Preditiva mensal de Vibração.	3	2	4	24	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração
Quebra da chaveta	Não transmissão do movimento do motor para o redutor	Excesso de torque	Não controlado.	3	1	4	12	Medição da carga exercida.	Monitoramento da carga exercida no redutor de acionamento através do motor.
		Folga na chaveta	Não controlado.	2	1	5	10	Utilização da chaveta com as medidas adequadas.	Garantir a utilização da chaveta adequada para o equipamento.
Falha de lubrificação	Desgastes dos conjuntos de engrenagens, eixos, pinhão e coroa	Utilização de óleo lubrificador inadequado	Checklist semanal de manutenção.	5	1	3	15	Implementação da Preditiva online	Implementação de sensor de medição de pressão de óleo
	Temperatura Excessiva	Presença de sujidades no óleo lubrificador	Não controlado.	4	4	4	64	Implementação de manutenção preventiva. Análise de óleo lubrificador	Realizar a troca preventiva do óleo do resaratório com menor periodicidade
	Diminuição na pressão de óleo de lubrificação	Vazamento de óleo por selos, retenores e mangueiras danificadas	Checklist trimestral de manutenção.	5	5	3	75	Implementação da Preditiva online	Implementação de sensor de medição de pressão de óleo
	Aumento na pressão do óleo de lubrificação	Entupimento das mangueiras de lubrificação	Checklist trimestral de manutenção.	5	3	3	45	Implementação da Preditiva online	Implementação de sensor de medição de pressão de óleo
Quebra da correia de acionamento do redutor	Não transmissão do movimento do motor para o redutor	Excesso de tensionamento na correia	Checklist trimestral de manutenção.	2	5	3	30	Implementação de manutenção preventiva com menor periodicidade	Diminuir periodicidade de inspeção sensível que avalia o acionamento
		Desgaste nos dentes da polia	Não controlado.	2	2	2	8	Implementação de manutenção preventiva com menor periodicidade	Incluir verificação do estado de conservação da polia no plano de inspeção do conjunto de acionamento do redutor.
		Rolamento do esticador da correia danificado	Inspeção Preditiva mensal de Vibração.	3	3	4	36	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração
		Ausência de tensionamento na correia	Checklist trimestral de manutenção.	3	2	3	18	Implementação de manutenção preventiva com menor periodicidade	Diminuir periodicidade de inspeção sensível que avalia o acionamento
Quebra/dano na carcaça do redutor	Vibração Excessiva	Folga na fixação da carcaça	Inspeção sensível mensal.	5	2	2	20	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração
	Empenamento dos componentes	Sobrecarga mecânica	Não controlado.	5	2	3	30	Medição da carga exercida.	Monitoramento da carga exercida no redutor de acionamento através do motor.
	Quebra dos outros conjuntos do redutor: Engrenagens, coroa, pinhão, rolemantos, eixos de entrada e saída								

Figura 30 – FMEA simplificado do redutor de acionamento do equipamento Necker CMB. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

A equipe de desenvolvimento do FMEA identificou sete principais modos de falha do equipamento em estudo, que são, em sua maioria, relacionados ao desgaste natural ou à falha no ajuste e na manutenção dos componentes do equipamento. Os modos de falha de quebra do conjunto de engrenagens, quebra ou travamento dos eixos de entrada e saída, e quebra da carcaça do redutor são modos que exigem a substituição de praticamente todos os componentes do redutor. Isso ocorre porque os conjuntos de eixo e pinhão, coroas e pinhões cônicos e engrenagens são lapidados juntamente, em pares, ou seja, caso ocorra algum dano aos conjuntos, o ideal é que estes sejam substituídos em conjunto.

Os modos de falha que exigem a substituição quase que por completo dos componentes do redutor geralmente atingem o estado de falha funcional devido ao desgaste por fadiga dos elementos girantes. Pelo fato do modo de operação do equipamento permanecer constante, entende-se que a função da equipe de manutenção é garantir o funcionamento adequado do redutor, ou seja, realizar as inspeções periódicas de lubrificação, de ajuste dos componentes do acionamento e de manutenção dos componentes em geral. Dessa forma, é garantida a operação do redutor em seu máximo de tempo de vida útil disponível, para que, após a falha funcional do redutor, este seja enviado para a manutenção na empresa terceirizada.

Quando são evidenciados os modos de falha de quebra da correia de acionamento e a quebra da chaveta, os mantenedores da empresa são capazes de realizar as manutenções de correção com rapidez, sem a necessidade de solicitar os serviços de manutenção da empresa terceirizada. Assim, esses modos de falha são considerados menos críticos, sendo monitorados em planos de inspeção quadrimestrais.

O modo de falha considerado mais crítico pela equipe de manutenção são as incidências de falha de lubrificação no redutor. O primeiro motivo para considerar esse modo como mais crítico está relacionado à sua severidade, pois, à medida que a falha ocorre pelo vazamento do óleo lubrificante, o atrito entre os dentes dos elementos girantes e o aumento da temperatura no redutor se tornam extremamente danosos para os componentes do equipamento. Esse modo de operação traz, como consequência, o desgaste dos elementos, o superaquecimento do conjunto, a falha nos rolamentos, o travamento dos eixos de entrada e saída, a quebra de dentes dos elementos girantes, a deposição de limalhas no óleo lubrificante, entre outros.

O segundo motivo para considerar o modo de falha de lubrificação como mais crítico está relacionado à sua probabilidade de ocorrência. As ocorrências de vazamento de óleo devido a danos nos selos e retentores são comuns na rotina de manutenção dos redutores de acionamento. Os selos e retentores são específicos para o equipamento e são fornecidos pela própria fabricante do redutor, o que inviabiliza a possibilidade de troca desses materiais por outra fabricante reconhecida. Dessa forma, entende-se que a principal melhoria para a redução do risco desse modo de falha de lubrificação está na

sua velocidade de detecção.

Os controles atuais utilizados no equipamento incluem a inspeção preditiva de vibração mensal - realizada por uma empresa terceirizada - e a execução de planos de inspeção e manutenção preventivas - realizados pela equipe de manutenção. Ainda assim, aproximadamente 30% das causas, modos e efeitos de falha não são monitorados e controlados pela equipe de manutenção. Dessa forma, a equipe desenvolvedora do FMEA realizou reuniões exclusivas para determinar melhorias nos controles atuais e implementar meios de monitoramento dos modos que atualmente não são controlados. A figura 31 representa os controles das falhas atuais e o controle das falhas após a implementação das melhorias sugeridas.

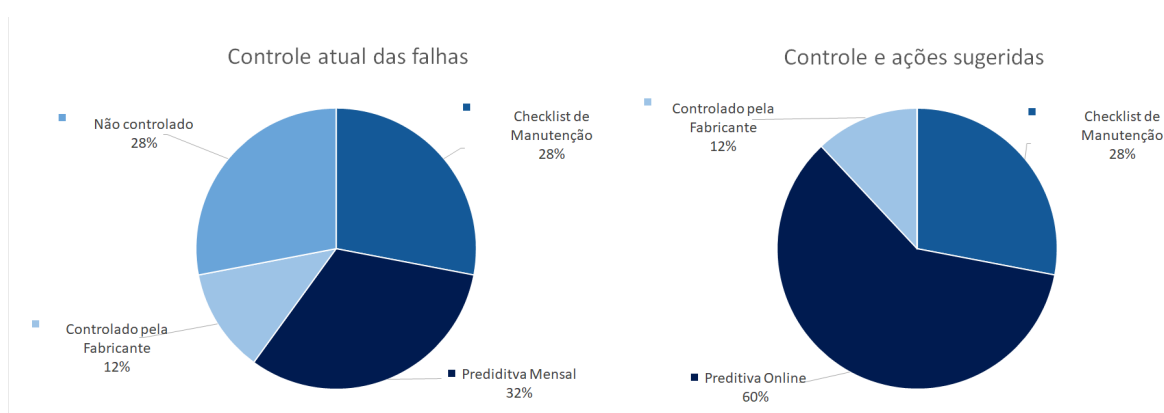


Figura 31 – Controle dos modos de falha atual e sugerido. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Por meio da figura 31 é possível observar que, ao implementar as ações sugeridas pela ferramenta do FMEA, todos os modos, efeitos e causas das falhas serão monitorados pela manutenção. Observa-se também que a implementação do novo sistema preditivo online será responsável por monitorar em tempo real aproximadamente 60% das possíveis falhas identificadas, por meio do monitoramento dos dados de vibração e temperatura do redutor. Além disso, sugere-se também a implementação de sensores responsáveis pelo monitoramento da pressão do óleo lubrificante.

O objetivo da implementação do sistema de monitoramento em tempo real da pressão de óleo é o de detectar com rapidez os vazamentos de óleo lubrificante ou entupimentos das mangueiras de lubrificação, evitando, assim, a ocorrência do modo de falha mais crítico identificado na ferramenta do FMEA: a falha por lubrificação. O sistema de monitoramento em tempo real também fornece um rápido acesso ao histórico de medições anteriores, sendo capaz de identificar, com mais facilidade, a tendência de ocorrência de falhas. Como exemplo, caso um dos retentores esteja danificado gerando um pequeno vazamento do óleo de lubrificação, o sistema de monitoramento irá identificar uma queda gradativa na pressão de óleo do redutor após cada abastecimento.

A fim de reduzir os indicadores de risco referentes à severidade, à ocorrência e à detecção dos modos de falha, a equipe de manutenção adotou uma estratégia direcionada à implementação de ações que aumentassem a facilidade de detecção da falha. A alteração da probabilidade de ocorrência está relacionada principalmente ao redesenho dos componentes, às alterações nos materiais utilizados por materiais mais resistentes, à adaptação das condições de operação, ao controle das condições ambientais em que o equipamento é operado, entre outros fatores. Dessa forma, para reduzir o indicador de ocorrência, foi desenvolvido um plano de manutenção preventivo para substituição de materiais com alta incidência de falha em menor intervalo de tempo, como, por exemplo, a substituição dos retentores, dos selos de vedação, da correia de acionamento e do esticador da correia.

Para realizar a redução da severidade de ocorrência de uma falha seria necessário projetar e instalar sistemas de redundância da falha ou sistemas de falha segura, que não provocam danos em outros componentes do equipamento. Como exemplo, caso seja identificado o vazamento de óleo de lubrificação, será acionado um sistema de lubrificação automático. A implementação desses sistemas de redundância e de falha segura é complexa e exige uma equipe de projetistas dedicados ao desenvolvimento dessas ações de melhoria. Dessa forma, a equipe de manutenção limita-se principalmente a desenvolver controles para detecção mais rápida e eficaz dos modos de falha.

O sistema de monitoramento online dos dados de vibração, temperatura e pressão de óleo lubrificante será utilizado para detectar cerca de 60% dos principais modos de falha identificados pela ferramenta do FMEA. Dessa forma, além dos procedimentos de instalação da infraestrutura do projeto da preditiva online e do treinamento dos mantenedores para o entendimento da plataforma de monitoramento, o trabalho da equipe de manutenção estará focado na análise diária dos dados coletados pelos sensores. Os itens que não são monitorados pelo novo sistema preditivo foram incorporados em planos de inspeção e de manutenção preventiva para que as suas respectivas substituições ocorram antes da falha funcional do equipamento.

Juntamente ao desenvolvimento da ferramenta do FMEA, foi realizado o preenchimento de um plano de ação para que fosse possível monitorar a implementação das ações de melhoria sugeridas na ferramenta. A figura 32 apresenta o plano de ação desenvolvido e o andamento das atividades necessárias para a implementação das melhorias identificadas.



Figura 32 – Plano de ação para a implementação das ações sugeridas no FMEA. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

4.3 Definição da estratégia de manutenção - Manutenção centrada em confiabilidade

O banco de dados de falha disponível do redutor de acionamento possui poucos termos amostrais, com alta variabilidade de valores de falha do equipamento. Segundo a tabela 12, o redutor já obteve ocorrências de falha entre períodos de 6 a 15 meses de operação, sendo o seu tempo médio de falha em operação de 11 meses. Pela alta variabilidade dos dados de falha, a definição do plano de inspeção, manutenção e troca do componente deve ser mais conservadora em relação aos intervalos entre atuações, a fim de evitar manutenções corretivas não programadas. A implementação de planos de inspeção com intervalos de tempo menores entre inspeções objetiva identificar com maior facilidade e rapidez possíveis falhas na operação do redutor, evitando, assim, as paradas de produção não programadas.

A implementação da estratégia de manutenção corretiva não programada seria proveitosa para a empresa no sentido de utilizar o tempo máximo de vida útil do componente. Entretanto, a manutenção corretiva implica na imprevisibilidade da ocorrência de falha, podendo ocasionar paradas de produção com alta duração e, conseqüentemente, perdas significativas de produção. A manutenção completa do equipamento, como a troca das engrenagens, dos eixos, dos pinhões e das coroas, é realizada pela fabricante do redutor que utiliza um tempo médio de manutenção de 50 dias. Assim, os redutores que são retirados da operação são diretamente enviados à empresa terceirizada para que sejam reparados os elementos danificados do redutor. Dessa forma, é possível observar outro risco envolvido na implementação da estratégia da manutenção corretiva, relacionado à probabilidade da ausência de redutor reserva para caso de quebra ou falha imprevista.

O requisito da empresa para a área da manutenção inclui a redução de quebras e falhas imprevistas que, por conseqüência, influenciam paradas de linha não programadas e redução na entrega da produção. Outros requisitos importantes para a manutenção são a redução dos custos de manutenção em empresas terceirizadas e o melhor aproveitamento do tempo de vida útil restante dos componentes. Dessa forma, a implementação de inspeções programadas e de atuações demandadas sob condição do equipamento possivelmente irão suprir adequadamente os requisitos da empresa para a manutenção.

Para a definição dos intervalos ideais para inspeção, manutenção e substituição dos componentes do redutor foram utilizadas a análise estatística da função de confiabilidade e a ferramenta de análise de modos e efeitos de falha, de maneira a identificar, com maior facilidade e rapidez, a presença de defeitos que resultarão em falha iminente do equipamento. Assim, foram definidas três principais inspeções, com valores de confiabilidade de 98 a 100%, como pode ser observado na tabela 15.

Periodicidade de atuação	Confiabilidade
Inspeção Diária	100,00%
Inspeção Mensal	100,00%
Inspeção Quadrimestral	98,89%
Troca sugerida baixa probabilidade de quebra (240 dias de uso)	83,68%
Troca com média probabilidade de quebra (330 dias de uso)	52,95%
Troca com alta probabilidade de quebra (Acima de 345 dias de uso)	46,8%
MTTF - Tempo até a falha (334,9912 dias)	50,91%

Tabela 15 – Confiabilidade da periodicidade dos planos de inspeção e manutenção do redutor. Fonte: Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Atualmente, a empresa se encontra em processo de implementação do sistema preditivo online, utilizando-se ainda dos serviços da empresa terceirizada para medição dos dados de vibração e temperatura dos componentes da linha de produção. Dessa forma, o plano de manutenção sugerido inclui as ações de análise de vibração e temperatura de ambas as partes: da empresa terceirizada realizada mensalmente e da equipe de manutenção realizada diariamente, por meio da plataforma do sistema preditivo. Assim que o novo sistema de monitoramento preditivo for completamente implementado, os itens referentes às atuações da empresa terceirizada nos planos de inspeção e manutenção dos redutores poderão ser excluídos.

Sugere-se, então, a implementação de um plano de manutenção que inclui atuações diárias, mensais e quadrimestrais. Deve-se destacar a necessidade de disponibilidade de pelo menos dois redutores reservas a partir dos três primeiros meses de substituição de um dos redutores em operação, devido ao longo intervalo solicitado pela empresa terceirizada para realizar a manutenção do redutor. A figura 33 apresenta o plano de manutenção sugerido para o redutor de acionamento.

PLANO DE INSPEÇÃO/MANUTENÇÃO REDUTORES DE ACIONAMENTO				
PERIODICIDADE		ATIVIDADE	RESPONSÁVEL	STATUS
DIÁRIO	1	Lubrificação diária do redutor (HC 320)	Lubrificador	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	2	Inspeção visual para identificação de vazamento de óleo.	Lubrificador	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	3	Análise diária do estado de operação do redutor - Sistema preditivo de vibração, termografia e pressão de óleo lubrificante.	Analista PCM	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
MENSAL	1	Análise preditiva da empresa terceirizada - Vibração do equipamento em operação.	Funcionário da empresa terceirizada	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	2	Inspeção do retentor de vedação do óleo de lubrificação. Substituir quando necessário.	Manutenção Mecânica	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	3	Inspeção das mangueiras de lubrificação. Atuar caso seja identificado algum tipo de entupimento.	Manutenção Mecânica	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	4	Verificar o alinhamento do conjunto. Atuar se necessário.	Funcionário da empresa terceirizada	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	5	Verificar o tensionamento da correia de acionamento. Atuar se necessário.	Manutenção Mecânica	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
QUADRIMESTRAL	1	Análise preditiva da empresa terceirizada - Temperatura do equipamento em operação.	Funcionário da empresa terceirizada	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	3	Realizar a análise da qualidade do óleo de lubrificação	Lubrificador	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	4	Realizar a limpeza externa geral do equipamento.	Manutenção Mecânica	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	5	Inspeção Sensitiva - Estado de conservação da Carcaça (presença de trincas, fixação do conjunto, etc)	Manutenção Mecânica	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	6	Inspeção Sensitiva - Estado de conservação do sistema de acionamento (sistema do esticador, correia, transmissão do motor, etc).	Manutenção Mecânica	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	7	Inspeção do estado de conservação da correia de acionamento. Substituir quando necessário.	Manutenção Mecânica	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	8	Inspeção do estado de conservação da polia do acionamento. Substituir quando necessário.	Manutenção Mecânica	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	9	Inspeção do estado de conservação do esticador da correia de acionamento. Substituir quando necessário.	Manutenção Mecânica	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	10	Inspeção dos retentores de vedação, dos selos mecânicos e das mangueiras de lubrificação. Substituir quando necessário.	Manutenção Mecânica	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	11	Medição da carga exercida no redutor através do motor	Mantenção Elétrica	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
	SUBSTITUIÇÃO SUGERIDA	1	Substituição sugerida com baixa probabilidade de quebra - 240 dias de funcionamento	Manutenção Mecânica
2		Substituição sugerida com média probabilidade de quebra - 330 dias de funcionamento	Manutenção Mecânica	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
3		Substituição sugerida com alta probabilidade de quebra - Acima de 345 dias de funcionamento	Manutenção Mecânica	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>
4		Caso seja realizada a manutenção do redutor, torna-se necessário substituir todos os conjuntos de eixo e pinhão juntamente, assim como as coroas e os pinhões cônicos, pois estes são lapidados aos pares. O mesmo deve ser aplicado às engrenagens danificadas, todo o conjunto deve ser substituído.	Analista PCM	OK <input type="checkbox"/> NOK <input type="checkbox"/>

Figura 33 – Plano de inspeção e manutenção sugerido para o redutor de acionamento.
Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

O plano de manutenção sugerido engloba o acompanhamento dos modos, dos efeitos e das causas das falhas identificadas na ferramenta do FMEA. Observa-se ainda que, no momento em que o sistema preditivo online esteja implementado na unidade, boa parte das atividades realizadas pela equipe de manutenção será minimizada, sendo possível realocar suas atividades para outras áreas de atuação que apresentam maior criticidade para a linha de produção.

A substituição do redutor sugerida no plano de manutenção leva em consideração a confiabilidade do componente após seu período de operação, como pode ser observado na tabela 15. Entretanto, o sistema preditivo online fornece um banco de dados do histórico da vibração e da temperatura do equipamento que permite monitorar a tendência da evolução dos efeitos de falha. Assim, a equipe de manutenção é capaz de estimar o momento certo de substituição do redutor de acordo com seu estado de operação.

O plano de inspeção sugerido inclui a inspeção sensitiva, de vibração, de qualidade de óleo lubrificante, de medição de carga exercida e de temperatura de trabalho do redutor de acionamento. Dessa forma, a estratégia de manutenção sugerida para a manutenção do redutor, baseada nos conceitos da manutenção centrada em confiabilidade, inclui atividades das estratégias de manutenção preventiva, preditiva e por condição do equipamento.

4.4 Sistema Preditivo Online

O projeto de implementação do sistema de monitoramento preditivo online foi aprovado pela empresa fabricante de latas com o intuito de compreender a real necessidade da utilização dessa automatização nas inspeções de manutenção. Foram selecionados, para a instalação do sistema preditivo online, dois equipamentos pilotos com altos índices de parada de produção devido a falhas funcionais em seus conjuntos e subconjuntos. Além do alto índice de falhas, os dois equipamentos selecionados são compostos por peças e componentes com altos custos de aquisição, sendo inviável utilizar-se apenas das práticas da manutenção preventiva para garantir o funcionamento do equipamento.

O sistema inclui sensores de medição de vibração e temperatura, eletrônicas de diagnóstico para o armazenamento e transmissão dos sinais coletados, e o software de parametrização e visualização dos dados adquiridos. Neste estudo, utilizaram-se os dados de vibração e temperatura dos componentes do equipamento *Necker CMB*, responsável pela conformação da região do pescoço da lata. Especificamente, foi estudada a operação de três redutores de velocidade responsáveis pela transmissão do acionamento dos motores para as estações de conformação do equipamento.

O monitoramento em tempo real das condições de operação dos diversos componentes presentes no equipamento oferece diversas vantagens para a área de manutenção

como um todo. Além de reduzir as inspeções sensíveis que exigem as paradas de produção, esse sistema permite a rápida detecção de falhas ou tendências de falha. Pode-se também destacar a possibilidade de monitorar componentes críticos presentes no interior dos equipamentos, sem o envolvimento direto de técnicos de medição. Por último, a principal vantagem da instalação desse tipo de sistema é o amparo dos dados de falha nas tomadas de decisão, pois, ao acompanhar a tendência da falha, é possível programar a substituição dos componentes de maneira estratégica, utilizando-se de seu máximo de tempo de vida útil disponível.

A plataforma de visualização dos dados permite a observação do histórico das velocidades globais coletadas durante a operação do equipamento. Dessa forma, é possível acompanhar a tendência de vibração e temperatura dos componentes monitorados. A fim de compreender a tendência de vibração dos redutores em operação, os dados foram coletados e tratados através do software *Matlab*. Para o procedimento de filtragem de sinais foi utilizado o aplicativo *Signal Analyzer* presente também no software *Matlab*. Utilizou-se a filtragem *Robust Quadratic regression* com um *smoothing factor* de 0,3. A figura 34 representa o histórico das velocidades globais coletadas do redutor de acionamento 3 no período de dezembro de 2021 a abril de 2022.

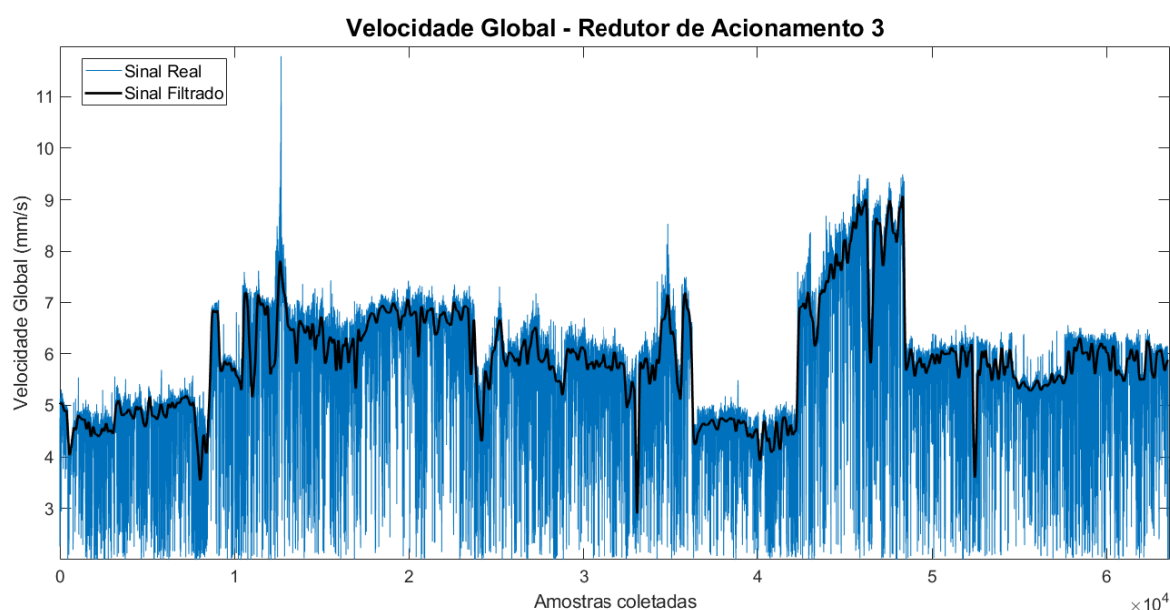


Figura 34 – Velocidade global de operação do redutor de acionamento 3. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

4.4.1 Detecção de falhas

Uma das principais vantagens da implementação do sistema preditivo online é a rápida detecção das falhas potenciais. Por meio do desenvolvimento da ferramenta dos FMEA foi possível identificar os principais modos de falha dos redutores de acionamento em estudo. Para o intervalo de tempo analisado, foram detectadas duas falhas nos reduto-

res analisados: a primeira relacionada a um rolamento danificado no esticador da correia de acionamento, e a segunda referente a uma falha de lubrificação do redutor de acionamento 5. A figura 35 é uma representação da figura 34 com a identificação dos pontos de início e de eliminação da falha.

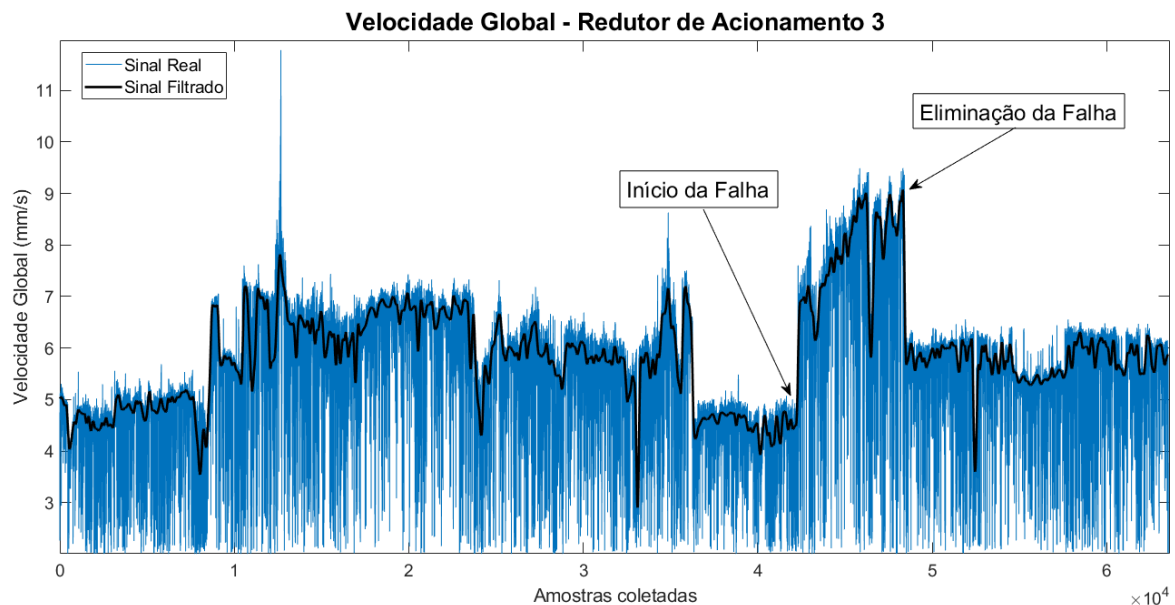


Figura 35 – Representação da ocorrência da falha no redutor. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Por meio da figura 35, é possível observar o comportamento da velocidade global do redutor com uma variação de 4 a 8 mm/s. Observa-se ainda que, a partir de certo momento, a velocidade global do redutor apresentou um aumento brusco e repentino, destacado pela figura pelo início da falha potencial. Após o início da falha potencial, observou-se a tendência crescente da velocidade global, indicando um aumento da probabilidade de ocorrência da falha funcional do equipamento.

Através do monitoramento do sistema preditivo, a detecção da falha potencial foi evidenciada após 59 horas de operação em modo de falha. Destaca-se ainda que os níveis de alerta e alarme da velocidade global do redutor são de 8 mm/s e 12 mm/s, respectivamente. Assim, nesse período de 59 horas de operação em modo de falha, o redutor ainda apresentava estado de alerta, sendo possível programar sua manutenção corretiva com flexibilidade.

Após a detecção da falha potencial, a equipe de manutenção foi acionada para a realização de uma inspeção sensitiva no redutor de acionamento 3. Um rolamento danificado no esticador da correia de acionamento do redutor foi identificado, o que ocasionou o travamento do sistema e, como consequência, a vibração excessiva do conjunto de acionamento. Dessa forma, foi programada a substituição do esticador em uma oportunidade da parada de linha no dia posterior a identificação da falha. A figura 36 apresenta um

esquema das fases de início, detecção e eliminação da falha.

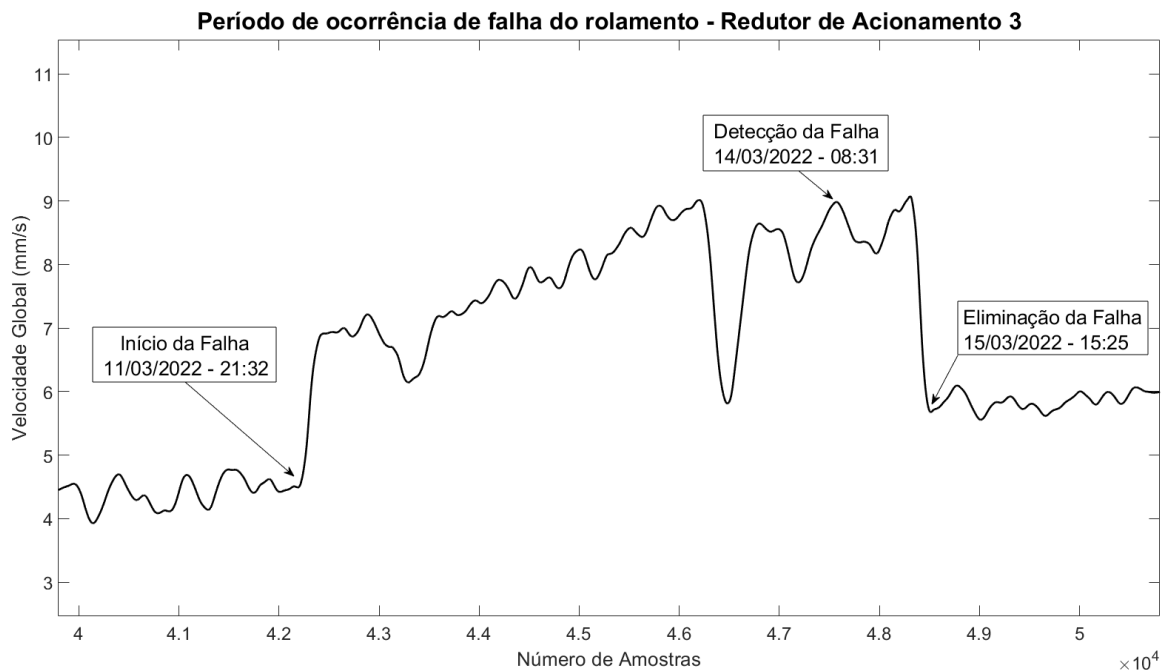


Figura 36 – Início, detecção e eliminação da falha no redutor. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Ainda a partir da figura 36, é possível observar que, mesmo após a eliminação da causa e do efeito da falha, a velocidade global do redutor não retornou ao seu comportamento inicial, anterior à sua operação em modo de falha. Esse comportamento é considerado comum, pois o sistema operou em falha por um período considerável, o que pode ter afetado a operação de outros componentes do redutor, iniciando, assim, outros modos de falha ainda não detectados.

Ao contrário do defeito observado na figura 35, a falha evidenciada no redutor de acionamento 5 foi repentina e imprevisível. O dano em uma das mangueiras de lubrificação ocasionou o vazamento de todo o volume de óleo do reservatório do redutor. A velocidade global coletada no período de ocorrência da falha alcançou um pico de 42 mm/s. A figura 37 apresenta o comportamento do redutor em todo o seu período de operação.

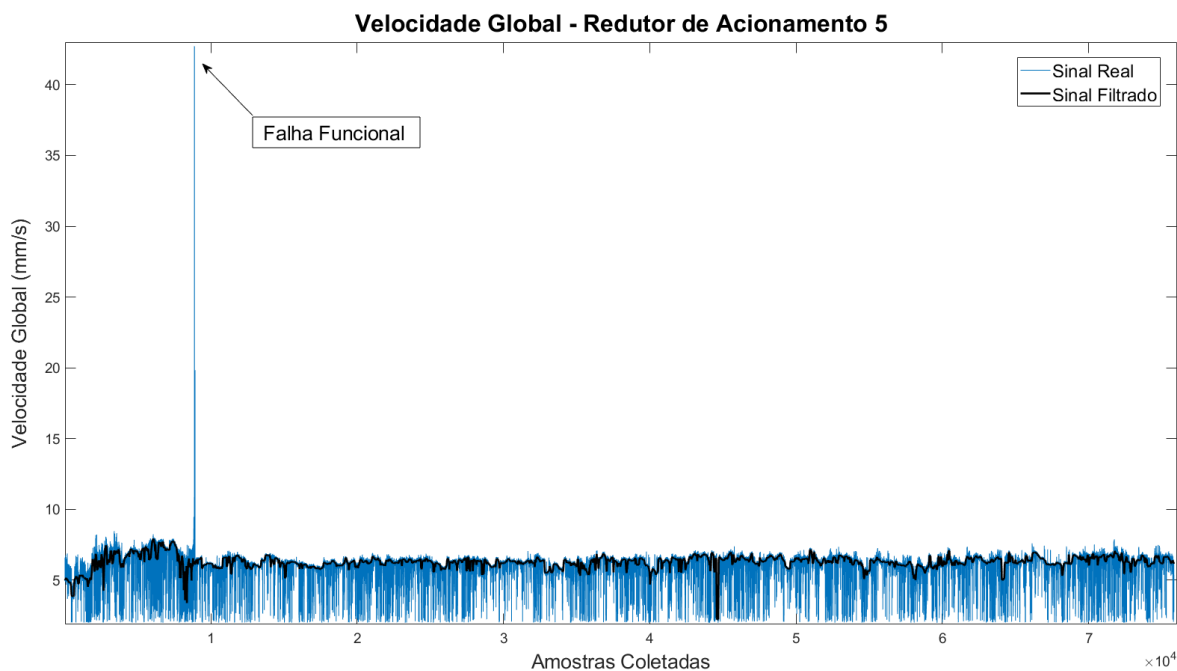


Figura 37 – Velocidade global de operação do redutor de acionamento 5. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

A faixa de operação normal do redutor varia entre 4 e 7 mm/s de velocidade global. Após a ocorrência de vazamento de óleo e a partir do momento em que o equipamento não possuía mais nenhum lubrificante para executar sua função de transmissão, os valores coletados para velocidade global atingiram 35 e 42 mm/s. Nesse momento, o vazamento foi observado pelos operadores da linha de produção, que imediatamente realizaram a parada total do equipamento. A figura 38 apresenta o relatório do supervisor de produção sobre o problema ocorrido no redutor de acionamento.

Relatório de Produção - Turma D - 30/12/2021					
Horário	Equipamento	Tipo de falha	Descrição	Solução Detalhada	Observações
23:00	Necker CMB	Falha de Lubrificação	Mangueira de óleo do redutor 5 rasgou vazando todo o óleo do reservatório e gerando falta de óleo para os redutores	Feito contato com o supervisor de manutenção, e feito a troca da mangueira de óleo do redutor 1(parado) com o redutor 5. Feito o reabastecimento do reservatório com óleo Spartan 320. Houve demora no abastecimento, pois o container que estava disponível não possuía óleo suficiente, sendo necessário buscar um novo no depósito.	
24:00:00	Necker CMB	Falha de Lubrificação	Redutor 5 danificado	Ao ligar o sistema de óleo foi detectado um outro vazamento no redutor. Também foi observado que as engrenagens estavam rodando livre. Em contato com o mecânico do equipamento foi determinado que rodariam em baixa, com apenas os redutores 3 e 4. Também alinhado que o mecânico virá amanhã para trocar o redutor danificado. Tempo total de parada: 1 hora.	

Figura 38 – Relatório de detalhamento da ocorrência da falha. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Como relatado pelo supervisor de turno da produção, a falha de lubrificação dos redutores ocasionou a falha funcional do redutor de acionamento 5, sendo necessário

realizar a sua substituição no dia posterior à sua ocorrência. Por se tratar de uma falha repentina e imprevisível, o sistema de monitoramento online não foi capaz de detectar essa tendência de falha. O esquema do período em que a falha foi evidenciada pode ser observado na figura 39 a seguir.



Figura 39 – Período de ocorrência de falha de lubrificação. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Por meio da figura 39, observa-se que a falha funcional do redutor 5 se iniciou por volta das vinte e duas horas e cinquenta e um minutos, e a parada total do equipamento foi realizada à meia noite e cinco minutos do dia posterior. O pico de vibração se deu, provavelmente, pelo dano estrutural causado aos elementos do redutor, que estavam em funcionamento sem a presença do óleo lubrificante. Junto à análise de vibração, a figura 40 apresenta o comportamento da temperatura do redutor na ocorrência do defeito.

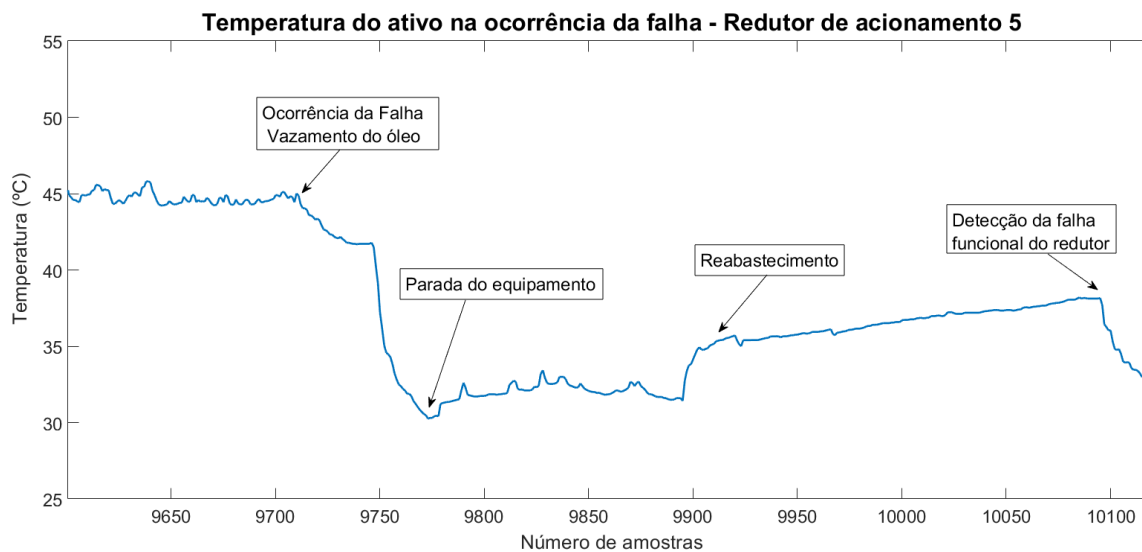


Figura 40 – Temperatura de operação do equipamento na ocorrência da falha. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

A figura 40 evidencia a queda de temperatura do redutor a partir do momento em que o vazamento de óleo lubrificante se inicia. Esperava-se, inicialmente, para esse tipo de falha, um aumento na temperatura do redutor pela ausência do óleo lubrificante, pois este também é responsável pelo resfriamento dos componentes rotativos. O óleo lubrificante é o responsável por conduzir o calor dos elementos rotativos para a carcaça do redutor. Logo, o comportamento de aumento da temperatura na ocorrência da falha não foi detectado pela ausência do óleo lubrificador.

A figura 40 também apresenta as atuações realizadas pelos mantenedores para mitigar a falha. Após a parada do equipamento, os responsáveis pelo ativo substituíram a mangueira de lubrificação e iniciaram o reabastecimento dos redutores de acionamento. Após o reabastecimento, a máquina foi acionada em modo manual, para aquecer o óleo lubrificante injetado. Nesse momento foi observada a falha funcional dos elementos rotativos do redutor de acionamento 5. A falha dos elementos rotativos gerou outra falha de lubrificação do redutor, que pode ser observada na redução da temperatura ao final da curva apresentada na figura 40.

Diante disso, o sistema de monitoramento preditivo online não foi adequado para detectar e alertar imediatamente os modos de falhas que ocorrem de maneira repentina. Para garantir a não ocorrência desse tipo de falha repentina, sugere-se a implementação do plano de manutenção preventiva do equipamento, apresentado na figura 33, que inspeciona e substitui os componentes desgastados com certa periodicidade.

Como descrito no relatório da produção, o mecânico do equipamento fez a intervenção neste e a substituição do redutor de acionamento 5. O redutor danificado foi enviado para a empresa terceirizada para que fosse realizada a manutenção nos conjuntos

defeituosos. Foi necessário substituir quase todos os componentes do redutor devido ao grande desgaste ocasionado pela falta de lubrificação na operação do redutor. As figuras 41 e 42 apresentam relatório da empresa terceirizada referente ao serviço de manutenção realizado no redutor danificado.

Produto: Motoredutor Helicoidal de Eixos Paralelos GFL07-2WSCR-1F I=15904

Número de série 10000170765455

Defeito apresentado: - Redutor com vazamento de óleo.

Resultado da análise: Pinhão da base GNA com dentes danificados;
Engrenagem primária danificada;
Eixo pinhão danificado;
Engrenagem de saída com dentes danificados;
Eixo de saída com desgaste;
Um lado da carcaça com desgaste no alojamento do rolamento do eixo pinhão.

Ações corretivas no produto: Trocar pinhão, engrenagem primária, eixo pinhão, engrenagem de saída, eixo de saída, lado da carcaça, rolamentos, retentores, junta, óleo, selo mecânico, fazer limpeza, testes e pintura.

Mão de obra técnica: 08 horas.

Figura 41 – Relatório de manutenção realizado pela empresa terceirizada. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

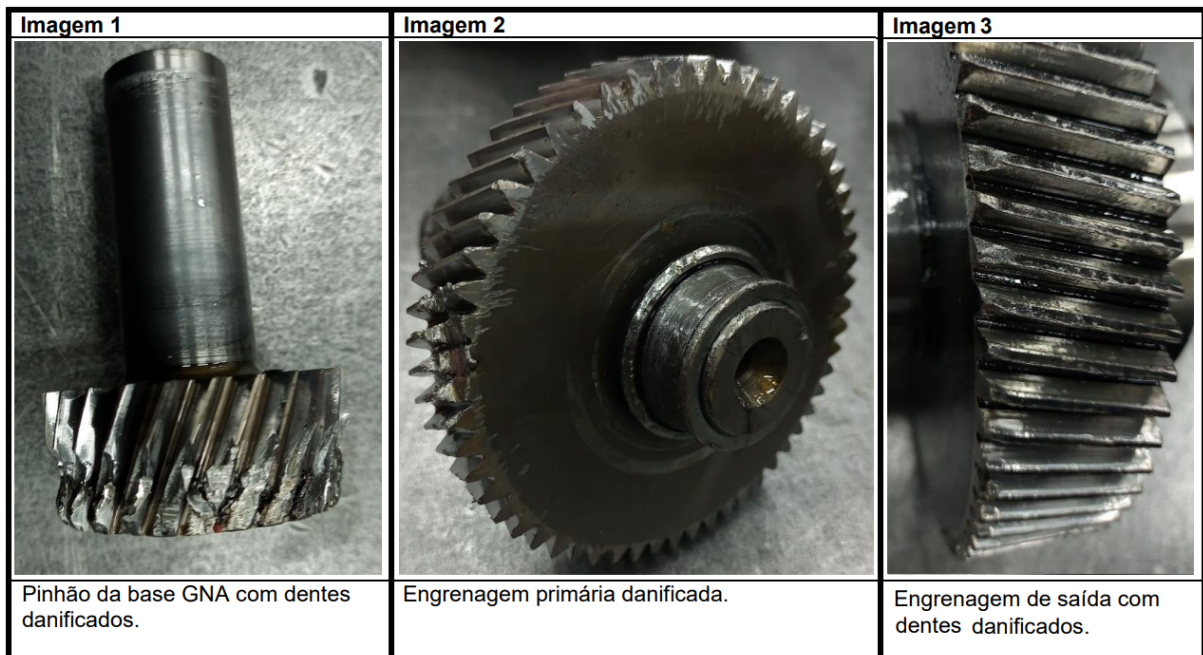


Figura 42 – Evidência dos defeitos nos componente rotatórios do redutor. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Com base no relatório enviado pela empresa terceirizada, observa-se que a falha por

falta de lubrificação no redutor foi extremamente crítica e ocasionou defeitos estruturais em quase todos os componentes do equipamento. Logo, torna-se importante salientar que a utilização do sistema preditivo online é muito útil para identificação de falhas não repentinas, que apresentam tendência e evolução dos modos de falha, mas, ainda, deve-se utilizar as estratégias de inspeção/manutenção preventiva para diminuir a incidência das falhas imediatas e imprevisíveis.

A fim de evitar as ocorrências de falhas funcionais repentinas, como foi evidenciado no redutor 5 pela falha de lubrificação, sugere-se, como proposta de melhoria, a implementação de um sistema de automatização do equipamento que desative sua operação, à medida que os componentes de alta criticidade atinjam níveis de vibração danosos à sua integridade estrutural. Dessa forma, deve-se também desenvolver um painel de visualização de diagnóstico para que seja possível identificar rapidamente o motivo da atuação de parada geral do equipamento. Assim, a falha potencial será detectada antes da ocorrência da falha funcional do equipamento, o que evitará danos maiores à integridade dos componentes monitorados.

4.4.2 Identificação das causas da falha

Além de permitir a rápida detecção dos modos de falha, o sistema preditivo online permite identificar as prováveis causas que mais influenciam a velocidade global do redutor coletada pelo acelerômetro. O software de parametrização e visualização de dados permite a criação de diferentes objetos de estudo, como a análise do balanceamento, do alinhamento, da integridade dos rolamentos, das folgas, entre outros. Como explicado anteriormente, cada tipo de defeito em máquinas rotativas traz como consequência diferentes modos e características de vibração. Portanto, com base nos dados coletados, o software realiza a análise do sinal e fornece um diagnóstico sobre qual a principal fonte de vibração gerada na operação do componente.

A velocidade global compreende toda a vibração presente no equipamento monitorado. As fontes de vibração podem ser inúmeras, como o desbalanceamento, o desalinhamento, o empenamento de componentes, a folga entre componentes, os danos nos rolamentos, o desgaste dos elementos rotativos, entre outros. Assim, a velocidade global é equivalente à soma de todas as velocidades geradas pelas diferentes fontes de vibração. A figura 43 representa os dados coletados filtrados acerca da vibração do redutor 3 e os respectivos diagnósticos do software de monitoramento preditivo.

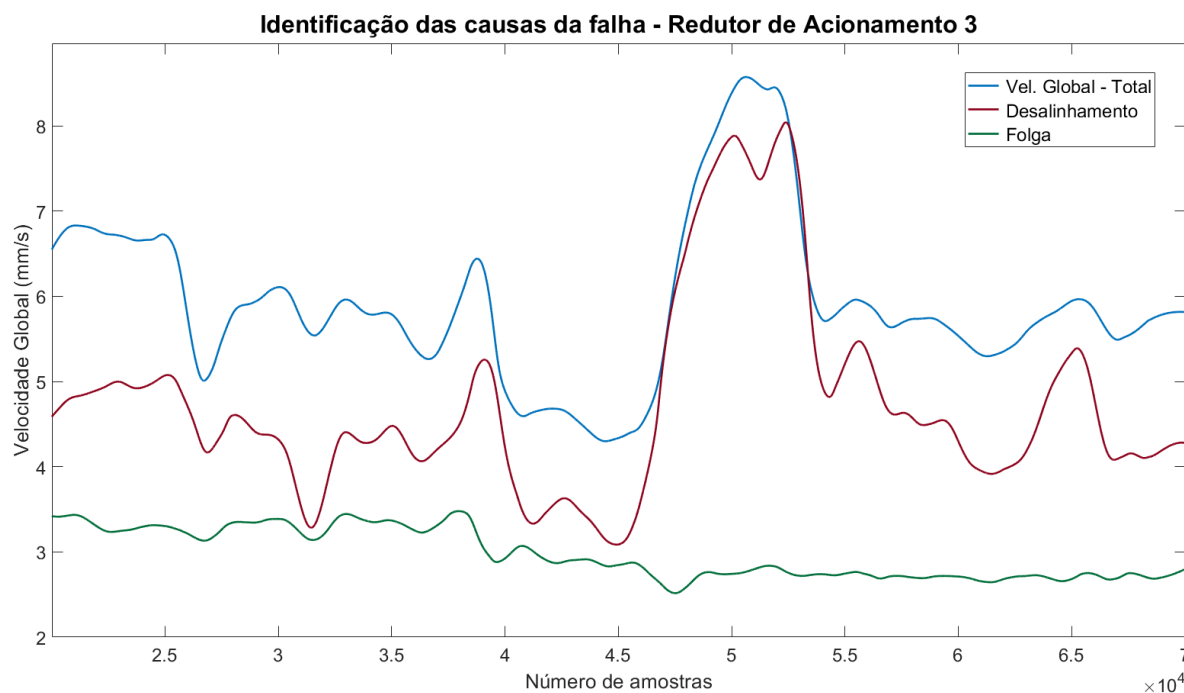


Figura 43 – Diagnóstico das causas da falha. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Para o caso do redutor de acionamento 3, de acordo com a figura 43, observa-se que a principal fonte de vibração está relacionada ao desalinhamento dos componentes do redutor. O desalinhamento pode estar relacionado a danos nos componentes de acionamento do redutor, assim como ao empenamento dos eixos de entrada ou de saída, entre outros. Apesar da velocidade global do redutor estar presente na região de operação normal, o acompanhamento das causas que mais influenciam na geração de falhas são de extrema importância para a programação das futuras atuações e entendimento das tendências dos tempos de vida útil restantes dos equipamentos.

4.4.3 Estimativa tempo de vida útil restante- Redutor de acionamento 5

A estimativa do tempo de vida útil restante do redutor, por meio dos dados obtidos no sistema preditivo online, é um dos objetivos específicos do presente trabalho. Para que esse objetivo seja alcançado, é necessário que exista um histórico dos dados de diversas falhas monitoradas. O entendimento sobre a tendência da vibração do equipamento, nos intervalos entre os modos de falha potencial e funcional, é muito importante para determinação do tempo de vida útil restante do redutor.

O banco de dados existente contempla o monitoramento de 115 dias de operação dos redutores. Durante esse período, foi evidenciada a ocorrência de uma falha funcional repentina, sem a presença da evolução dos níveis de vibração, e de uma falha potencial que, antes de alcançar os níveis críticos de operação, foi submetida a manutenção corretiva. Portanto, o histórico de dados coletados no período de análise não foi suficiente para

compreender a tendência de vibração dos modos de falha e desenvolver uma estimativa para o tempo de vida útil restante dos redutores em operação. A figura 44 apresenta o sinal de vibração filtrado do redutor de acionamento 5.

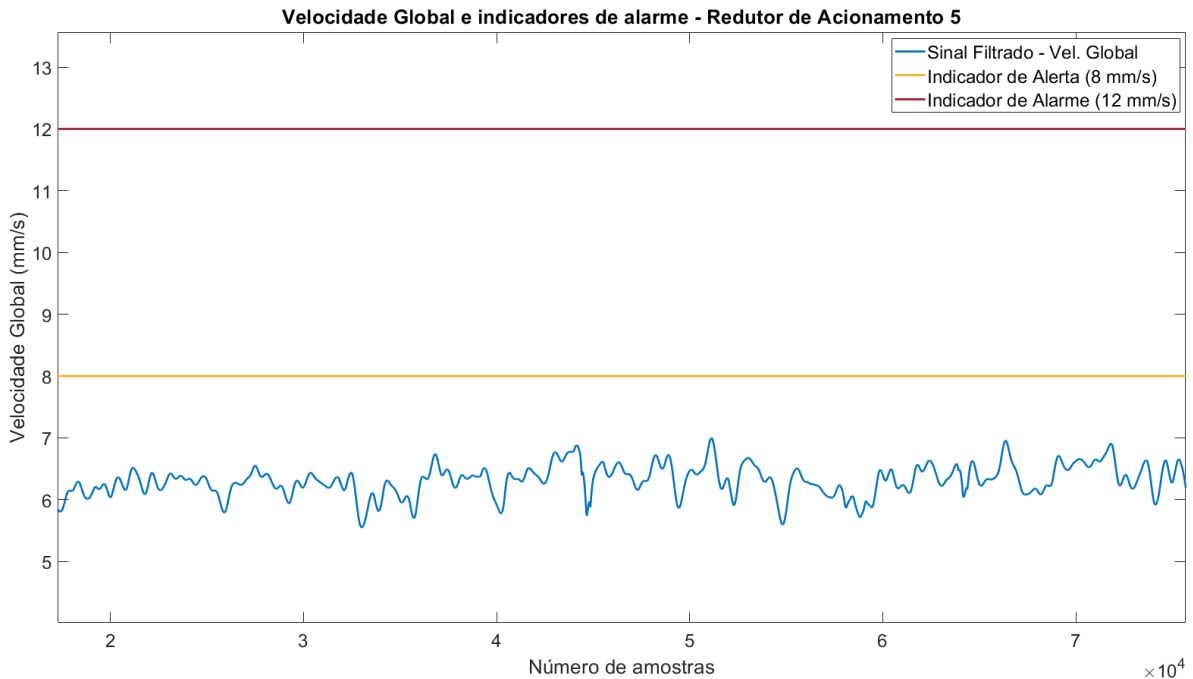


Figura 44 – Velocidade global do redutor de acionamento 5. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

A figura 44 ilustra uma tendência constante de vibração do redutor e os intervalos considerados críticos para a operação, equivalentes aos níveis de alerta e alarme. Por não apresentar nenhum comportamento de modo de falha, o desenvolvimento de uma estatística referente ao tempo de vida útil restante desse redutor resultaria em valores com baixa confiabilidade.

Para um caso em que houvesse disponível o histórico de poucas amostras de dados de falha, seria possível desenvolver um banco de dados com os defeitos simulados para, então, alimentar o modelo estatístico de previsão do tempo até a falha do sistema preditivo. Como não há amostras de falha com evolução dos níveis de vibração, torna-se inviável desenvolver um banco de dados simulados.

Portanto, pelo comportamento constante de trabalho e pela ausência de dados de falha monitorados, não foi possível realizar a estimativa do tempo de vida útil restante dos equipamentos em operação.

4.5 Viabilidade de implementação da Preditiva online

4.5.1 Viabilidade Técnica

Atualmente a empresa fabricante de latas utiliza diversas estratégias de manutenção para garantir o funcionamento adequado de seus ativos. A tendência da equipe de manutenção é priorizar as atividades de inspeção e de manutenção preventiva para detecção das falhas potenciais e programação da execução das atuações corretivas nas paradas de produção planejadas.

Além da utilização das estratégias de manutenção preventiva, a indústria fabricante de latas utiliza o serviço de uma empresa terceirizada, que é responsável por realizar análises preditivas de vibração, mensalmente, e preditivas de termografia, trimestralmente. A empresa terceirizada fornece à equipe de manutenção um relatório dos pontos críticos detectados na análise de vibração realizada. A equipe de manutenção executa inspeções sensitivas dos pontos críticos detectados na preditiva e programa as atuações necessárias.

O projeto de melhoria da implementação do sistema de manutenção preditiva online foi idealizado com o objetivo de automatizar o sistema de coleta e processamento de dados de vibração dos equipamentos mais críticos da linha de produção. O sistema foi implementado em dois equipamentos críticos da linha de produção, que foram definidos como projetos pilotos, para avaliar a viabilidade de utilização desse tipo de manutenção em outras áreas críticas da linha de produção. Dessa forma, um dos objetivos específicos do presente trabalho é avaliar a viabilidade técnica de instalação e utilização deste tipo de manutenção nos equipamentos críticos da linha de produção da empresa fabricante de latas.

O objeto de estudo para a análise da viabilidade técnica de implementação do sistema preditivo é o equipamento *Necker*, mais precisamente dos redutores de acionamento das estações de conformação. A ferramenta do FMEA foi desenvolvida para identificar os modos e efeitos de falha do equipamento estudado e avaliar os controles atuais e riscos envolvidos nas ocorrências dessas falhas. Observa-se no FMEA que boa parte das ações de melhoria sugeridas estão relacionadas à implementação do sistema de monitoramento da operação do redutor em tempo real, pois este facilitaria o processo de detecção das ocorrências de falha com maior antecedência.

Para melhor compreender as vantagens e desvantagens da utilização dos dois tipos de estratégias preditivas, a preditiva online - dados coletados em tempo real - e a preditiva offline - dados coletados uma vez por mês -, foi desenvolvida uma tabela comparativa, observada na figura 45.

Viabilidade Técnica - Sistema Preditivo ONLINE X OFFLINE	
Preditiva Online	
VANTAGENS	DESvantagens
Monitoramento em tempo real das condições de operação dos equipamentos;	Alto custo envolvido na compra de equipamentos e treinamentos;
Acesso facilitado ao histórico das condições de operação;	Alto custo envolvido em treinamentos da equipe de manutenção treinamentos;
Entendimento da tendência de operação dos pontos monitorados;	Necessidade de pessoal capacitado para analisar os dados coletados;
Inspeção da vibração dos pontos mapeados;	
Inspeção da temperatura dos pontos mapeados;	
Monitoramento de componentes localizados no interior dos equipamentos ;	
Coleta de dados automatizada sem a necessidade de pessoal técnico in loco;	
Rápida detecção da ocorrência de falhas;	
Aproveitamento do máximo de tempo de vida útil disponível dos componentes;	
Redução das inspeções sensíveis que exigem parada de produção;	
Diagnóstico automático das causas da Falha;	
Foco da equipe de manutenção se limita a análise das informações;	
Acesso seguro às informações remotamente;	
Compartilhamento de dados permite uma análise profunda feita por especialistas de áreas diferentes;	
Preditiva Offline	
VANTAGENS	DESvantagens
Inspeção sensível dos pontos monitorados mensalmente;	Necessidade de pessoal técnico para realizar a coleta de dados;
Inspeção da vibração dos pontos mapeados - mensalmente;	Alta periodicidade de medição;
Recebimento de relatório com destaque dos pontos críticos identificados;	Possibilidade de medição apenas de pontos externos do equipamento;
Inspeção de termografia dos painéis elétricos - Trimestralmente;	Necessidade da troca antecipada dos equipamentos com tendência de falha;
Diagnóstico prévio das causas da falha;	

Figura 45 – Vantagens e desvantagens da implementação dos sistemas preditivos online e offline. Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Por se tratar de uma fábrica que produz de forma contínua e executa paradas de manutenção com duração de duas horas a cada quinze dias, a constância da produção e a redução das paradas de linha não programadas são requisitos essenciais para que a entrega do volume de produção solicitado pelo cliente seja realizada. Diante disso, investimentos na área de manutenção que objetivam reduzir as paradas de manutenção não programadas são incentivados pela alta gestão da empresa.

Apesar das estratégias utilizadas pela equipe de manutenção serem suficientes para garantir um bom funcionamento dos ativos da linha, a implementação do sistema de sensoriamento online dos equipamentos irá diminuir, cada vez mais, a incidência de falhas funcionais não detectadas, o que reduzirá por consequência, as paradas não programa-

das dos equipamentos da linha de produção. Além disso, esse tipo de sistema permite a aplicação de melhorias na área de automação dos equipamentos, sendo possível assegurar a integridade dos componentes em operação que apresentem modos de falha potencial detectáveis.

Portanto, o sistema preditivo online apresenta diversas vantagens para os equipamentos monitorados e para a equipe de mantenedores desses ativos. Destaca-se ainda que, apesar da viabilidade técnica de implementação do sistema preditivo online, recomenda-se executar os planos de manutenção sugeridos na figura 33, para que os itens que não são monitorados diretamente pelo sistema preditivo permaneçam sendo acompanhados por meio das inspeções sensitivas. Ao utilizar-se das duas estratégias de manutenção, a execução do plano de manutenção sugerido juntamente com o monitoramento preditivo online, a equipe de manutenção será capaz de utilizar o tempo máximo disponível de vida útil do redutor e, ainda, de reduzir as ocorrências de parada de produção devido a falhas nesse equipamento.

Por fim, conclui-se que o sistema preditivo online é tecnicamente viável para implementação na linha de produção da fabricante de latas de alumínio, junto à execução de estratégias de inspeção e manutenção preventivas.

4.5.2 Viabilidade Econômica

Uma das desvantagens da utilização de sistemas preditivos com coleta de dados realizada em tempo real é o alto custo de instalação do projeto como um todo. Esse tipo de sistema exige a instalação de uma infraestrutura complexa e de sensores com alto custo de aquisição. As informações financeiras referentes à indústria fabricante de alumínio são sigilosas, não sendo possível acessar as informações sobre a taxa mínima de atratividade do projeto, o fluxo de caixa previsto e os custos mensais dedicados à área de manutenção.

A fim de fornecer uma análise relacionada à viabilidade econômica de implementação do sistema preditivo, foram fornecidos os valores de investimento inicial do projeto, o tempo de quitação desse investimento e os valores mensais destinados ao serviço de coleta de vibração pelo sistema preditivo offline. A figura 46 apresenta uma perspectiva do *payback* do investimento de aquisição e instalação do sistema preditivo online.

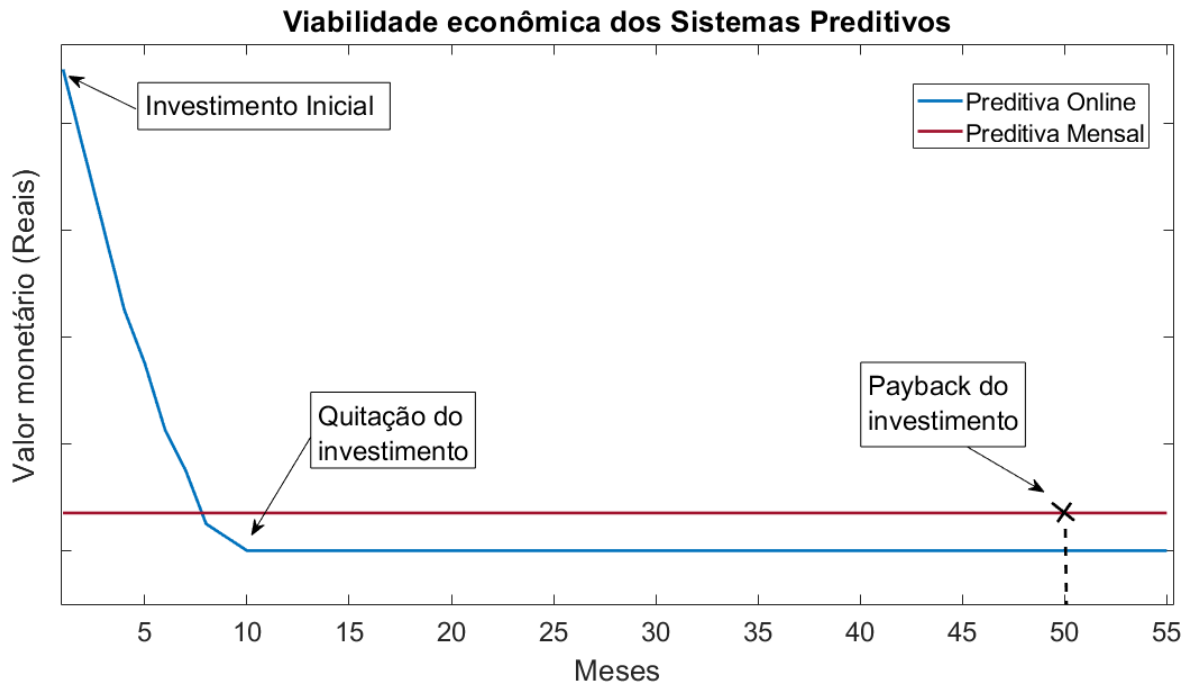


Figura 46 – Viabilidade econômica de implementação da preditiva onlin Fonte: Autora (sob autorização da empresa fabricante.)

Segundo a figura 46, o *payback*, ou o tempo de retorno do investimento inicial do sistema preditivo online, em comparação com o sistema preditivo offline, é de aproximadamente 50 meses. Os custos mensais para a manutenção do sistema preditivo online foram estimados para a aquisição de três sensores de vibração.

A análise realizada através da figura 46 é simplória, pois não considera: (i) o fluxo de caixa dos meses seguintes à implementação, (ii) a redução dos custos da área de manutenção devido a diminuição das atuações e (iii) a redução dos custos de aquisição de equipamentos por conta da diminuição das ocorrências de falha e quebra. Logo, considerando apenas a redução dos custos de utilização do serviço de preditiva online, o tempo de retorno do investimento é de no máximo 50 meses.

Dessa forma, ao analisar as diversas vantagens da utilização do sistema de monitoramento em tempo real dos equipamentos de alta criticidade da linha de produção, como pode ser observado na figura 46, e considerando um *payback* máximo de cinquenta meses, conclui-se que a instalação do sistema de manutenção preditivo online é economicamente viável para a linha de produção da empresa fabricante de latas de alumínio.

5 Conclusões

Os grandes avanços tecnológicos ocorridos no setor industrial favoreceram a competitividade entre as empresas fabricantes de bens e serviços, influenciando o aumento da capacidade produtiva com alta personalização, qualidade e custos competitivos. A estratégia de manutenção dos ativos da linha de produção é um dos principais aspectos que impactam a capacidade produtiva de uma indústria. A definição adequada da estratégia de manutenção irá aumentar a disponibilidade de produção dos equipamentos, sem gerar grandes impactos financeiros à empresa, e reduzir a incidência de falhas funcionais nos equipamentos operantes.

O objetivo do presente trabalho era avaliar a viabilidade técnica de implementação de um sistema de manutenção preditiva online, que coleta dados de vibração e temperatura de equipamentos em tempo real, de uma empresa fabricante de latas de alumínio. Para alcançar o objetivo determinado, foi realizado um estudo de caso do redutor de um dos equipamentos mais críticos da linha de produção, o *Necker CMB*.

Por meio do histórico de dados de falha do redutor de acionamento e, utilizando a abordagem estatística fornecida pelas técnicas de manutenção centrada em confiabilidade, foi possível determinar o indicador de tempo médio até a falha (MTTF) do redutor. De acordo com os resultados dos indicadores de manutenção obtidos, foi desenvolvido um plano de manutenção preventiva para o objeto de estudo. A aplicação da ferramenta dos modos e efeitos de falha também auxiliou a construção do plano de manutenção preventiva do ativo.

A ferramenta do FMEA foi desenvolvida junto à equipe técnica de mantenedores da fabricante de latas de alumínio, no qual foram determinados os modos, efeitos e causas de falha, assim como também, os atuais controles existentes e as melhorias sugeridas para o processo. Após essa identificação inicial, a equipe desenvolvedora avaliou todos os modos de falha em relação à sua severidade, sua probabilidade de ocorrência e sua facilidade de detecção. Os modos de falha com maior risco avaliado foram priorizados para a implementação das ações de melhoria sugeridas. Portanto, a aplicação da ferramenta do FMEA foi proveitosa para avaliar os possíveis modos de falha funcional e promover ações de melhoria para redução do risco de incidência dessas ações.

O estudo da viabilidade da implementação do novo sistema preditivo online foi realizado por meio da análise dos dados fornecidos pelo sistema, que indicavam a facilidade de detecção de falhas e o rápido diagnóstico das causas das falhas. Por meio do monitoramento em tempo real da operação foi possível identificar e mitigar um modo de falha em um intervalo de aproximadamente cinco dias. Dessa forma, ao comparar o tempo

de detecção do sistema preditivo online com o do atual sistema utilizado pela empresa, que compreende na inspeção mensal de pontos determinados, conclui-se que a preditiva online permite a detecção mais facilitada das ocorrências de falha.

A utilização de sistemas de monitoramento preditivo em tempo real fornece diversas vantagens para a área de manutenção de uma empresa, como por exemplo, a facilidade na detecção de defeitos, o aproveitamento do máximo de tempo de vida útil dos componentes, o acompanhamento das tendências de vibração, o diagnóstico automático das causas da falha, entre outros. Entretanto, um importante aspecto que pode impedir a utilização deste tipo de sistema é o alto custo de aquisição. Para a empresa analisada no presente trabalho, os principais requisitos a serem alcançados pela área de manutenção são a redução das paradas de linha não programadas e a minimização das falhas funcionais dos ativos.

Dessa forma, por se tratar de um sistema que não possui um alto custo de aquisição, e por oferecer diversas vantagens técnicas para a área de manutenção e para integridade dos ativos em operação, conclui-se que a implementação do sistema preditivo de monitoramento online é viável tecnicamente e economicamente para a empresa fabricante de latas de alumínio.

Referências

- ABOELMAGED, M. G. Predicting e-readiness at firm-level: An analysis of technological, organizational and environmental (toe) effects on e-maintenance readiness in manufacturing firms. *International Journal of Information Management*, Volume 34, Issue 5, Pages 639-651, 2014. Citado na página 15.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5462*: Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994. Citado 6 vezes nas páginas 15, 20, 21, 22, 23 e 49.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10082*: Ensaio não destrutivo - análise de vibrações - avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 rpm a 15000 rpm. Rio de Janeiro, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 7, 28 e 29.
- BAHETI, R.; GILL, H. Cyber-physical systems. *The Impact of Control Technology*, T. Samad and A.M. Annaswamy (eds.), 2011. Citado na página 46.
- BALDISSARELLI, L.; FABRO, E. Manutenção preditiva na indústria 4.0. *SCIENTIA CUM INDUSTRIA*, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 25.
- BAUER, F. C. B. L. E. Condicionantes das medições termográficas para avaliação da temperatura em fachadas. *X Simpósio brasileiro de tecnologias das argamassas*, 2013. Citado na página 31.
- BERG, H.; WILTS, H. *Digital platforms as market places for the circular economy—requirements and challenges*. *NachhaltigkeitsManagementForum* 27, 1–9 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00550-018-0468-9>, 2018. Citado na página 47.
- BORLIDO, D. J. A. Indústria 4.0 - aplicação a sistemas de manutenção. Tese (Mestrado) Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2017. Citado na página 47.
- COELHO, P. M. N. Rumo à indústria 4.0. Tese (Mestrado) Faculdade de ciências e Tecnologia - Universidade de Coimbra, 2016. Citado na página 47.
- DODSON, B.; SCHWAB, H. *Accelerated testing : a practitioner's guide to accelerated and reliability testing*. In: *Accelerated testing : a practitioner's guide to accelerated and reliability testing*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 1, n. 1. Citado 6 vezes nas páginas 7, 32, 33, 34, 36 e 37.
- ESTEVEZ, M. A. et al. Utilização de machine learning em uma estação de tratamento de efluentes. *Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.
- FERREIRA, S. J. S. Diagnóstico de máquinas elétricas pela análise de vibração. Instituto superior de engenharia do Porto, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 10, 26 e 27.
- FOGLIATTO, F. S. Confiabilidade e manutenção industrial. In: *Confiabilidade e manutenção industrial*. [S.l.: s.n.], 2011. v. 1, n. 2, p. 10–60. Citado 18 vezes nas páginas 10, 20, 21, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 49, 51, 52, 53, 54 e 55.

- GREGORIO, G. F. P.; SANTOS, D. F.; PRATA, A. B. Engenharia de manutenção. In: *Engenharia de manutenção*. [S.l.: s.n.], 2018. v. 1, p. 35–40. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- GUBBI, J. et al. Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems* Volume 29, Issue 7, September 2013, Pages 1645-1660,, 2013. Citado na página 46.
- IFELL, E. E. Inspeção e análise termográfica. <https://www.ifell.com.br/termografia/>, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 31.
- IFM. Manual de operação sistema eletrônico de diagnóstico para sensores de vibração vse002. fm electronic Ltda.(Centro Logístico) R. Dona Francisca, 8300 Bloco 4 – Módulo E Distrito Industrial - Joinville – SC – 89219-600, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 66.
- International Organization for Standardization. *ISO 7919: Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts — Part 3: Coupled industrial machines*. [S.l.], 2009. Citado na página 28.
- International Organization for Standardization. *ISO 10816: Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Supplement 1: Methodology for selecting machinery vibration standards, including the shaft vibration (ISO/TR 19201:2013)*. [S.l.], 2013. Citado 5 vezes nas páginas 7, 28, 29, 30 e 65.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*. Acatech - National Academy of Science and Engineering, 2013. Citado na página 45.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. Manutenção:função estratégica. In: *Manutenção:Função Estratégica*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 1, n. 3, p. 26–28. Citado 8 vezes nas páginas 20, 21, 30, 40, 51, 52, 54 e 55.
- LASI, H. et al. Industry 4.0. *Business e Information Systems Engineering*, 2014. Citado na página 16.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; H.KAO. Cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters* 3., 2015. Citado na página 16.
- MARCORIN, W. R.; LIMA, C. R. C. Análise dos custos de manutenção e de não-manutenção de equipamentos produtivos. *REVISTA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA* • V. 11, Nº 22 – pp. 35-42, 2003. Citado na página 22.
- MATHWORKS. *Predictive Maintenance Toolbox™ Getting Started Guide*. The MathWorks, Inc.n 1 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 72.
- MOBLEY, R. An introduction to predictive maintenance. In: *An introduction to predictive maintenance*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, n. 2, p. 23–32. Citado 3 vezes nas páginas 7, 23 e 24.
- MOUBRAY, J. Manutenção centrada em confiabilidade. In: *Mantenção Centrada em confiabilidade*. [S.l.: s.n.], 1997. v. 1, n. 1, p. 10–80. Citado 9 vezes nas páginas 7, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 52 e 53.

- NIKOLIC, B. et al. Predictive manufacturing systems in industry 4.0: Trends, benefits and challenges. *Annals of DAAAM e Proceedings*, 2017. Citado na página 16.
- NORTON, M.; KARCZUB, D. G. Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers. In: *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 1, n. 2, p. 513–541. Citado na página 25.
- OLLILA, A.; MALMIPURO, M. Maintenance has a role in quality. *The Tqm Magazine*, 2019. Citado na página 15.
- PEREIRA, A.; SIMONETTO, E. O. Indústria 4.0: Conceitos e perspectivas para o brasil. *Revista da Universidade Vale do Rio Verde ISSN: 1517-0276 / EISSN: 2236-5362 Vol. 16 | n. 1 | Ano 2018*, 2018. Citado na página 46.
- PIVOTO, D. G. S. et al. Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in industry 4.0: A literature review. *Journal of Manufacturing Systems Volume 58, Part A, January 2021, Pages 176-192,, 2021*. Citado na página 46.
- PORTER, M. E.; HEPPELTMANN, J. E. How smart, connected products are transforming competition. *ARTICLE HARVARD BUSINESS REVIEW*, 2014. Citado na página 16.
- RUBMANN, M. et al. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *The Boston Consulting Group: BCG*, 2015, 2015. Citado na página 47.
- SAKURAI, R.; ZUCHI, J. D. As revoluções industriais até a indústria 4.0. *Faculdade de Tecnologia de Taquaritinga (FATEC) –SP –Brasil DOI: 10.31510/infa.v15i2.386*, 2018. Citado na página 45.
- SAMUEL, A. L. *Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers*. *IBM Journal*, v.3,n.3, 1959. Citado na página 47.
- SANCHES, I. J. Sobreposição de imagens de termografia e ressonância magnética: uma nova modalidade de imagem médica tridimensional. *Universidade tecnológica federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em engenharia elétrica e informática industrial*, 2009. Citado na página 31.
- SANTOS, B. P. et al. Indústria 4.0: Desafios e oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*, v.4, n.1, p.111-124, 2018, 2018. Citado na página 45.
- VIANA, H. R. G. Planejamento e controle da manutenção. In: *Planejamento e controle de manutenção*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, n. 3, p. 2–40. Citado 12 vezes nas páginas 7, 15, 21, 22, 23, 25, 38, 42, 43, 44, 49 e 50.
- WANG, S. et al. Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015. Citado na página 16.
- WIDODO, A.; YANG, B. S. Application of relevance vector machine and survival probability to machine degradation assessment. *Elsevier, Volume 38, Issue 3*, 2011. Citado na página 15.

Anexos

ANEXO A – Primeiro Anexo

FMEA
(Análise do Modo e Efeito de Falhas)



Nome do Processo: Redutores de acionamento das estações de conformação, flangeamento e reformer do Necker CMB 3400
 Responsável: Maria Eduarda Borges Galvão

Preparado por: Maria Eduarda Borges Galvão
 Data da Elaboração: 11/4/2022

DEFINIÇÃO INICIAL

Sistema	Linha de produção - Back End.
Subsistema	Equipamento de formão do pescoço da lata - Necker CMB.
Conjunto	Conjunto de acionamento das estações de conformação (8 a 12), flangeamento e reformer.
Componente	Redutores 3, 4 e 5 de acionamento das estações do equipamento.
Função	Reduzir a velocidade de rotação dos motores de acionamento e transmitir o toque para as estações de conformação, flangeamento e reformer
Padrão de desempenho	Redução da velocidade de entrada e transmissão de torque de saída de 1486 Nm

ANÁLISE & AVALIAÇÃO DE RISCOS

OTIMIZAÇÃO

REAVLIAÇÃO

COMPONENTE	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO POTENCIAL DA FALHA	TEMPO DE PARADA	DANOS PESSOAIS /MATERIAIS /AMBIENTAIS	CAUSAS POTENCIAIS	CONTROLES ATUAIS	CLASSIFICAÇÃO CONSEQUÊNCIA					AÇÕES RECOMENDADAS	DETALHE DA TAREFA	RESPONSÁVEL	INTERVALO ENTRE TAREFAS				
								SEV	OCC	DET	RPN					SEV	OCC	DET	RPN
Redutores 3, 4 e 5 de acionamento das estações do equipamento.	Quebra do conjunto de engrenagens	Vibração Excessiva	Troca do redutor - 2 horas	Danos Materiais - Substituição do redutor.	Falha de lubrificação	Checklist diário de manutenção.	MUITO CRÍTICA	5	4	3	60	Implementação da Preditiva online	Inspeção Termografia	Supervisores de manutenção Funcionários do PCM	Coleta de dados a cada 30 minutos. Analise dos dados diariamente	5	1	2	10
		Temperatura Excessiva			Desalinhamento	Inspeção Preditiva mensal de Vibração.		3	2	4	24	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração	Supervisores de manutenção Funcionários do PCM	Coleta de dados a cada 30 minutos. Analise dos dados diariamente	3	2	2	12
		Quebra da carcaça			Desgaste por fadiga (interferência, abrasivo ou sobrecarga)	Realizada pela fabricante. Também responsável pela manutenção dos componentes do redutor.		3	2	4	24	Solicitar Relatório de quebra e falha da empresa que realiza manutenção.	Compreender a causa da falha por fadiga. desenvolver plano de ação para redução do desgaste.	Funcionários do PCM	A cada manutenção realizada pela empresa terceirizada	3	2	3	18
		Contaminação do óleo de lubrificação com limárias ou sujidade			Folga inadequada entre os dentes da engrenagem	Realizada pela fabricante. Também responsável pela manutenção dos componentes do redutor.		2	1	5	10	Solicitar Relatório de quebra e falha da empresa que realiza manutenção.	Solicitar atestado de conformidade e qualidade de montagem dos componentes do redutor.	Funcionários do PCM	A cada manutenção realizada pela empresa terceirizada	2	1	3	6
	Travamento dos eixos de entrada e/ou saída	Temperatura Excessiva	Troca do redutor - 2 horas	Danos Materiais - Substituição do redutor	Rolamento danificado	Inspeção Preditiva mensal de Vibração.	INTERMEDIÁRIA	4	4	3	48	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração	Supervisores de manutenção Funcionários do PCM	Coleta de dados a cada 30 minutos. Analise dos dados diariamente	4	3	1	12
		Aumento na pressão do óleo de lubrificação			Dilatação do eixo pelo excesso de temperatura	Não controlado.		4	1	4	16	Implementação da Preditiva online	Inspeção Termografia	Supervisores de manutenção Funcionários do PCM	Coleta de dados a cada 30 minutos. Analise dos dados diariamente	4	1	1	4
		Vibração Excessiva			Desalinhamento	Inspeção Preditiva mensal de Vibração.		3	2	4	24	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração	Supervisores de manutenção Funcionários do PCM	Coleta de dados a cada 30 minutos. Analise dos dados diariamente	3	2	2	12
					Empenamento dos eixos	Inspeção Preditiva mensal de Vibração.		3	2	4	24	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração	Supervisores de manutenção Funcionários do PCM	Coleta de dados a cada 30 minutos. Analise dos dados diariamente	3	2	3	18
	Quebra dos eixos de entrada e/ou saída	Quebra dos outros conjuntos do redutor: Engrenagens, coroa, pinhão, rolemantos	Troca do redutor - 2 horas	Danos Materiais - Substituição do redutor	Excesso de carga	Não controlado.	MUITO CRÍTICA	5	2	3	30	Medição da carga exercida.	Monitoramento da carga exercida no redutor de acionamento através do motor.	Manutenção Elétrica	Inspeção Quadrimestral	5	2	2	20
					Travamento do eixo	Inspeção Preditiva mensal de Vibração.		4	2	2	16	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração	Supervisores de manutenção Funcionários do PCM	Coleta de dados a cada 30 minutos. Analise dos dados diariamente	4	2	1	8
					Desalinhamento/folga	Inspeção Preditiva mensal de Vibração.		3	2	4	24	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração	Supervisores de manutenção Funcionários do PCM	Coleta de dados a cada 30 minutos. Analise dos dados diariamente	3	2	2	12
					Desgaste por fadiga	Realizada pela fabricante. Também responsável pela manutenção dos componentes do redutor.		3	2	4	24	Solicitar Relatório de quebra e falha da empresa que realiza manutenção.	Compreender a causa da falha por fadiga. desenvolver plano de ação para redução do desgaste.	Funcionários do PCM	A cada manutenção realizada pela empresa terceirizada	3	2	3	18
Empenamento dos eixos					Inspeção Preditiva mensal de Vibração.	3		2	4	24	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração	Supervisores de manutenção Funcionários do PCM	Coleta de dados a cada 30 minutos. Analise dos dados diariamente	3	2	3	18	

FMEA
(Análise do Modo e Efeito de Falhas)



Nome do Processo: Redutores de acionamento das estações de conformação, flangeamento e reformer do Necker CMB 3400
Responsável: Maria Eduarda Borges Galvão

Preparado por: Maria Eduarda Borges Galvão
Data da Elaboração: 11/4/2022

DEFINIÇÃO INICIAL

Sistema	Linha de produção - Back End.
Subsistema	Equipamento de formação do pescoço da lata - Necker CMB.
Conjunto	Conjunto de acionamento das estações de conformação (8 a 12) , flangeamento e reformer.
Componente	Redutores 3, 4 e 5 de acionamento das estações do equipamento.
Função	Reduzir a velocidade de rotação dos motores de acionamento e transmitir o toque para as estações de conformação, flangeamento e reformer
Padrão de desempenho	Redução da velocidade de entrada e transmissão de torque de saída de 1486 Nm

ANÁLISE & AVALIAÇÃO DE RISCOS

OTIMIZAÇÃO

REAVLIAÇÃO

COMPONENTE	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO POTENCIAL DA FALHA	TEMPO DE PARADA	DANOS PESSOAIS /MATERIAIS /AMBIENTAIS	CAUSAS POTENCIAIS	CONTROLES ATUAIS	CLASSIFICAÇÃO CONSEQUÊNCIA	SEV	OCC	DET	RPN	AÇÕES RECOMENDADAS	DETALHE DA TAREFA	RESPONSÁVEL	INTERVALO ENTRE TAREFAS	SEV	OCC	DET	RPN		
Redutores 3, 4 e 5 de acionamento das estações do equipamento.	Quebra da chaveta	Não transmissão do movimento do motor para o redutor	Troca da chaveta - 1 hora	Danos materiais - Substituição da chaveta	Excesso de torque	Não controlado.	POUCO CRÍTICA	3	1	4	12	Medição da carga exercida.	Monitoramento da carga exercida no redutor através do motor.	Manutenção Elétrica	Inspeção Quadrimestral	3	1	2	6		
					Folga na chaveta	Não controlado.		2	1	5	10	Utilização da chaveta com as medidas adequadas.	Garantir a utilização da chaveta adequada para o equipamento.	Manutenção Mecânica	A cada manutenção realizada pela empresa terceirizada	2	1	4	8		
	Falha de lubrificação	Desgastes dos conjuntos de engrenagens, eixos, pinhão e coroa	Troca do redutor - 2 horas	Danos Materiais - Substituição do redutor	Utilização de óleo lubrificador inadequado	Checklist semanal de manutenção.	MUITO CRÍTICA	5	1	3	15	Implementação da Preditiva online	Implementação de sensor de medição de pressão de óleo	Supervisores de manutenção Funcionários do PCM	Coleta de dados a cada 30 minutos. Analise dos dados diariamente	5	1	1	5		
					Temperatura Excessiva	Manutenção do sistema de lubrificação - 1 hora		Presença de sujidades no óleo lubrificador	Não controlado.	4	4	4	64	Implementação de manutenção preventiva. Análise de óleo lubrificador	Realizar a troca preventiva do óleo do reservatório com menor periodicidade	Operadores da linha de produção	Inspeção Quadrimestral	4	3	2	24
					Diminuição na pressão de óleo de lubrificação	Manutenção para retirada de vazamento de óleo - 1 hora		Vazamento de óleo por selos, retentores e mangueiras danificados	Checklist semestral de manutenção.	5	5	3	75	Implementação da Preditiva online	Implementação de sensor de medição de pressão de óleo	Supervisores de manutenção Funcionários do PCM	Coleta de dados a cada 30 minutos. Analise dos dados diariamente	5	3	3	45
					Aumento na pressão do óleo de lubrificação	Manutenção para retirada de entupimento das mangueiras de lubrificação - 1 hora		Entupimento das mangueiras de lubrificação	Checklist semestral de manutenção.	5	3	3	45	Implementação da Preditiva online	Implementação de sensor de medição de pressão de óleo	Supervisores de manutenção Funcionários do PCM	Coleta de dados a cada 30 minutos. Analise dos dados diariamente	5	3	2	30
	Quebra da correia de acionamento do redutor	Não transmissão do movimento do motor para o redutor	Troca da correia de acionamento - 0,25 horas	Danos materiais - Substituição de componentes do sistema de acionamento (Polia, correia, esticador, rolamentos)	Excesso de tensionamento na correia	Checklist semestral de manutenção.	POUCO CRÍTICA	2	5	3	30	Implementação de manutenção preventiva com menor periodicidade	Diminuir periodicidade de inspeção sensível que avalia o acionamento	Operadores da linha de produção	Inspeção Quadrimestral	2	2	3	12		
					Desgaste nos dentes da polia	Não controlado.		2	2	2	8	Implementação de manutenção preventiva com menor periodicidade	Incluir verificação do estado de conservação da polia no plano de inspeção do conjunto de acionamento do redutor.	Operadores da linha de produção	Inspeção Quadrimestral	2	1	2	4		
					Rolamento do esticador da correia danificado	Inspeção Preditiva mensal de Vibração.		3	3	4	36	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração	Supervisores de manutenção Funcionários do PCM	Coleta de dados a cada 30 minutos. Analise dos dados diariamente	3	2	2	12		
					Ausência de tensionamento na correia	Checklist semestral de manutenção.		3	2	3	18	Implementação de manutenção preventiva com menor periodicidade	Diminuir periodicidade de inspeção sensível que avalia o acionamento	Operadores da linha de produção	Inspeção Quadrimestral	3	2	2	12		
Quebra/dano na carcaça do redutor	Vibração Excessiva	Troca do redutor - 2 horas	Danos Materiais - Substituição do redutor.	Folga na fixação da carcaça	Inspeção sensível mensal.	MUITO CRÍTICA	5	2	2	20	Implementação da Preditiva online	Inspeção Vibração	Supervisores de manutenção Funcionários do PCM	Coleta de dados a cada 30 minutos. Analise dos dados diariamente	5	1	1	5			
				Sobrecarga mecânica	Não controlado.		5	2	3	30	Medição da carga exercida.	Monitoramento da carga exercida no redutor de acionamento através do motor.	Manutenção Elétrica	Inspeção Quadrimestral	5	2	2	20			

ANEXO B – Segundo Anexo



VES004
Software Analisador de Vibração

Network (LAN)



EL01	EL02	EL03	EL04	EL05	EL06	EL07	EL08	EL09
<ul style="list-style-type: none">1 Temp. Motor Stage32 Temp. Redutor Stage33 Vibr. LA Motor Stage34 Vibr. LA Redutor Stage35 Vibr. LA Motor Stage46 Vibr. LA Redutor Stage4	<ul style="list-style-type: none">7 Temp. Motor Stage48 Temp. Redutor Stage49 Vibr. LA Motor Stage510 Vibr. LA Redutor Stage511 Temp. Motor Stage512 Temp. Redutor Stage5	<ul style="list-style-type: none">13 Temp. LA Eixo Torre Princ. Estação Interna14 Temp. LOA Torre Estação Interna15 Vibr. LA Torre Estação Interna16 Vibr. LA Torre Estação Interna17 Vibr. LOA Torre Estação 818 Vibr. LOA Torre Estação 8	<ul style="list-style-type: none">19 Temp. LA Torre Estação 820 Temp. LOA Torre Estação 821 Temp. LA Torre Estação 922 Temp. LA Torre Estação 923 Vibr. LOA Torre Estação 924 Vibr. LA Torre Estação 9	<ul style="list-style-type: none">25 Temp. LA Torre Estação 1026 Temp. LOA Torre Estação 1027 Vibr. LA Torre Estação 1028 Vibr. LOA Torre Estação 1029 Vibr. LA Torre Estação 1130 Vibr. LOA Torre Estação 11	<ul style="list-style-type: none">31 Temp. LA Torre Estação 1132 Temp. LOA Torre Estação 1133 Temp. LA Torre Estação 1234 Temp. LOA Torre Estação 1235 Vibr. LOA Torre Estação 1236 Vibr. LA Torre Estação 12	<ul style="list-style-type: none">37 Temp. LA Torre Estação Flanger38 Temp. LOA Torre Estação Flanger39 Vibr. LA Torre Estação Flanger40 Vibr. LOA Torre Estação Flanger41 Vibr. LA Torre Estação Reformer42 Vibr. LOA Torre Estação Reformer	<ul style="list-style-type: none">43 Temp. LA Torre Estação Reformer44 Temp. LOA Torre Estação Reformer45 Temp. Eixo Principal 01 Alimentação Waxer46 Vibr. Eixo Principal 01 Alimentação Waxer47 Vibr. Eixo Principal 02 Waxer48 Vibr. Eixo Principal 03 Waxer	<ul style="list-style-type: none">49 Temp. Blower Vácuo de Transferência50 Temp. Blower de Saída do Reformer51 Temp. Blower Single File52 Vibr. Blower Vácuo de Transf.53 Vibr. Blower de Saída do Reformer54 Vibr. Blower Single File

