

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS GUARAPUAVA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

KARINA CHEMIM CABRAL

**ANÁLISE DE FALHA EM MANCAL DE ROLAMENTO
AUTOCOMPENSADOR DE ROLOS DE UMA MÁQUINA DE
PAPEL**

**GUARAPUAVA
2018**

KARINA CHEMIM CABRAL

**ANÁLISE DE FALHA EM MANCAL DE ROLAMENTO
AUTOCOMPENSADOR DE ROLOS DE UMA MÁQUINA DE
PAPEL**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à
Coordenação de Engenharia Mecânica, como
requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Mecânica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. David Lira Nunez

GUARAPUAVA
2018

TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE FALHA EM MANCAL DE ROLAMENTO AUTOCOMPENSADOR DE ROLOS DE UMA MÁQUINA DE PAPEL

KARINA CHEMIM CABRAL

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em Guarapuava, Paraná na data 03 de dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

David Lira Nuñez
Prof. Orientador

Denise Alves Ramalho
Membro Da Banca

Ricardo Vinicius Bubna Biscaia
Membro Da Banca

Aldo Przybysz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Karina Chemim Cabral

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

CABRAL, Karina Chemim. **Análise de Falhas em Mancal de Rolamento Autocompensador de Rolos de Uma Máquina de Papel**. 2018. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Coordenação de Engenharia Mecânica (COEME), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2018.

RESUMO

Os recentes avanços na manutenção e gestão de ativos físicos se tornaram ferramentas importantes para evitar perdas e reduzir custos na produção. Sem esses avanços existiriam muitos problemas relacionados à redução da vida útil do maquinário industrial, queda na qualidade dos produtos fabricados, risco à segurança dos funcionários, maior demanda de trabalho e aumento dos custos e despesas, o que afetaria a lucratividade das empresas. Tendo em vista isso, a análise de falhas dos principais componentes mecânicos das máquinas é essencial para evitar paradas não-programadas. Nesse sentido, neste trabalho é proposto o uso da técnica de Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA) para analisar os motivos, causas e efeitos de uma falha em um mancal de rolamento autocompensador de rolos de uma indústria de papel e celulose. O mancal encontra-se localizado no rolo cabeceira de uma máquina de papel, no processo de formação da folha. A falha a ser analisada é a fratura do rolamento de um mancal. Essa falha pode ser causada devido à vibração excessiva do rolamento ou erro de montagem, visto que a ocorrência encontrada foi o superaquecimento do rolamento. Foram estratificadas mais causas para a ocorrência dessa falha partindo da hipótese que a causa raiz é a folga axial do rolamento. Também foram estabelecidas prioridades e ações para evitar a reincidência da falha e novas avarias em componentes mecânicos críticos da máquina em questão.

Palavras-chave: Gestão da Manutenção. FMEA. Componentes mecânicos. Modo de Falha. Mancal de Rolamento.

CABRAL, Karina Chemim. **Failure Analysis of Self Aligning Roller Bearing of a Pulp and Paper Manufacturing**. 2018. 56 f. Course final Project – Graduate School of Mechanical Engineering, Federal University of Technology - Paraná. Guarapuava. 2018.

ABSTRACT

Recent advances in the maintenance and management of physical assets have become important tools to avoid losses and reduce costs in production. Without these advances, there would be many problems related as the reduction in the remaining useful life of industrial machinery, a decline in the quality of manufactured products, a risk to employee safety, increased demand for work and increased costs and expenses, which would affect the profitability of companies. With this in mind, a failure analysis of the main mechanical components of machines becomes essential to avoid unplanned shutdowns. In this sense, this work proposes the use of Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) to analyze reasons for failures, their causes and effects in a self-aligning roller bearing of a pulp and paper industry. The bearing is located on the head roll of a paper machine in the process of forming the sheet of paper. The failure to be analyzed is the bearing fracture of a bearing. This failure can be caused due to excessive bearing vibration or assembly error, since the occurrence found was overheating of the bearing. More causes were stratified for the occurrence of this failure, starting from the hypothesis that the root cause is the axial clearance of the bearing. Priorities and actions have also been established to prevent recurrence of failure and further breakdowns in critical mechanical components of the machine in question..

Keywords: Maintenance Management. FMEA. Mechanical Components. Failure Mode. Rolling Bearing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Disponibilidade operacional.	15
Figura 2 – Rolamento de Esfera.	22
Figura 3 – Rolamento de Rolo.	23
Figura 4 – Rolamentos radiais.	24
Figura 5 – Rolamento axial com carga puramente axial.	24
Figura 6 – Rolamento axial com carga combinada.	24
Figura 7 – Ângulo de Contato.	25
Figura 8 – Rolamento autocompensador de rolos.	25
Figura 9 - Componentes.	26
Figura 10 – Furos cilíndricos.	27
Figura 11 – Furo cônico.	27
Figura 12 – Montagem por meio de uma bucha de fixação.	27
Figura 13 – Valores de referência de especificação de vida útil para diferentes tipos de máquina.	28
Figura 14 – Máquina para Fabricação de Papel.	32
Figura 15 – Sacudidor e rolo cabeceira ao fundo (lado LA).	33
Figura 16 – Rolo cabeceira lado LC.	34
Figura 17 – Rolo Cabeceira lado LA.	34
Figura 18 – Rolo Cabeceira.	35
Figura 19 - Rolamento.	36
Figura 20 - Rolamento.	37
Figura 21 - Trava e porca.	37
Figura 22 – Dimensões e dados do mancal e do rolamento.	38
Figura 23 – Rolamento autocompensador de rolos SKF 23220 CC/W33.	38
Figura 24 – Porca de Fixação KM 20.	39
Figura 25 – Dimensões (a).	40
Figura 26 – Dimensões (b).	40
Figura 27 – Dados rolamentos autocompensadores de rolos.	41
Figura 28 – Dados rolamentos autocompensadores de rolos (continuação).	42
Figura 29 – Viscosidade v_1	44
Figura 30 – Valores de referência para o fator de contaminação.	45
Figura 31 – Fator a_{SKF} para rolamentos de rolos radiais.	46
Figura 32 – Coleta Preditiva de Vibração.	47
Figura 33 – Causas da Falha.	48
Figura 34 – Causas principais da falha.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicadores que impactam nos custos da manutenção	17
Tabela 2 - Severidade	20
Tabela 3 - Ocorrência	21
Tabela 4 - Detecção	21
Tabela 5 – Disponibilidade da Máquina no Mês de Julho	36
Tabela 6 - Porca de Fixação KM 20	39
Tabela 7 – Dados de entrada para cálculo de vida útil	42
Tabela 8 – Custos da falha.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FMEA - Análise de Modos e Efeitos de Falha (do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*)

CBM - Manutenção baseada na Condição (do inglês *Condition-based Maintenance*)

LA - Lado de Acionamento

LC - Lado de Comando

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	JUSTIFICATIVA.....	11
1.2	OBJETIVOS	12
1.2.1	Objetivo Geral	12
1.2.2	Objetivos Específicos	12
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	MANUTENÇÃO PREVENTIVA E DISPONIBILIDADE	14
2.2	DISPONIBILIDADE OPERACIONAL RELACIONADA COM CUSTO.....	16
2.3	ANÁLISE DE EFEITOS E MODOS DE FALHA (FMEA).....	17
2.3.1	Modos de falhas.....	18
2.3.2	Causas de Falhas e Efeitos	19
2.3.3	Classificação da Análise de Efeitos e Modos de Falhas	20
	2.3.3.1 SEVERIDADE.....	20
	2.3.3.2 OCORRÊNCIA	21
	2.3.3.3 DETECÇÃO	21
	2.3.3.4 RISCO	21
2.4	MANCAIS DE ROLAMENTOS.....	22
2.4.1	Rolamentos de Esferas e de Rolos Cilíndricos.....	22
2.4.2	Rolamentos Radiais e Axiais.....	23
2.4.3	ROLAMENTOS AUTOCOMPENSADORES DE ROLOS	25
2.4.4	COMPONENTES E MATERIAIS	26
2.4.5	MONTAGEM E DESMONTAGEM.....	26
2.4.6	VIDA ÚTIL DO ROLAMENTO	28
3	ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1	APRESENTAÇÃO DA FALHA	32
4.2	DADOS	37
4.3	CÁLCULO DE VIDA ÚTIL	40
4.4	ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS.....	47
5	CONCLUSÕES	52
	REFERÊNCIAS	54
	APÊNDICE A – FMEA DO MANCAL DE ROLAMENTO DO ROLO CABECEIRA.....	56

1 INTRODUÇÃO

A competitividade e as exigências dos clientes têm feito com que as empresas busquem a redução dos custos e melhoria da qualidade. Para garantir essa qualidade e as necessidades do cliente, sem atrasos de produção e sem custos adicionais é preciso um monitoramento e controle eficiente dos equipamentos de uma determinada linha de produção. Esse monitoramento e controle podem ser realizados por meio de manutenção preventiva baseada na condição (CBM - do inglês *Condition-based Maintenance*) que aborda técnicas de análise de falhas em componentes mecânicos.

Uma técnica de análise para reduzir falhas de componentes ou de sistemas utilizada é a Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA – do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*), que identifica e hierarquiza as falhas potenciais e fornece ações para solucioná-las, ou seja, determina o efeito e causa de cada uma delas e identifica os pontos críticos (SAKURADA, 2001).

O objetivo da técnica de análise de falhas é agregar confiabilidade e disponibilidade ao produto e/ou processo de uma determinada organização. A FMEA está dentro desse contexto, mas a sua principal característica é a análise voltada para um elemento específico, componente ou sistema, objetivando identificar os modos de falha mais relevantes (SAKURADA, 2001).

O presente trabalho faz um estudo de caso em uma empresa de papel e celulose, onde será avaliado um componente mecânico crítico (mancal de rolamento autocompensador de rolos) de uma das linhas de produção da indústria em questão. O componente crítico é um rolo que está localizado dentro do primeiro processo da linha de produção da máquina, então qualquer falha no estágio inicial faz parar a produção da linha inteira. O mancal de rolamento faz o suporte desse rolo, tornando-se também um equipamento crítico na produção.

O estudo de caso consiste em realizar uma análise da falha por meio da FMEA, envolvendo seus modos de falhas, causas e efeitos no equipamento para propor ações de melhorias e evitar paradas desnecessárias no processo de produção. Com isso, também garantir a produção contínua, contenção de custos extras e melhoria nas condições operacionais das máquinas. A FMEA também auxilia a determinar a criticidade da falha (falha com maior risco de incidência) para o processo e a causa raiz do problema, bem como propor ações corretivas para a extinção de falhas similares.

1.1 JUSTIFICATIVA

No cenário atual, parada não programada de máquinas significa perda de produção, de matéria prima, manutenção corretiva e conseqüentemente aumento de custos para as organizações. Segundo dados do Documento Nacional 2017 da Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN), o custo de manutenção em relação ao faturamento bruto das empresas é de 3%. Toda empresa tem como objetivo contínuo a redução de custos e aumento de produção e qualidade. Assim, é essencial compreender o comportamento e o desempenho dos componentes mecânicos dos ativos industriais para evitar problemas futuros que gerem custos não programados e perdas. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), as técnicas usadas para identificar os pontos frágeis de um sistema fornecem subsídios para a melhoria contínua, auxiliando a mitigar falhas funcionais.

Existem várias técnicas de análise de falhas, as quais são definidas e classificadas em *top-down* e *bottom-up*. As abordagens *top-down* são usadas em operações e análises que começam de um nível alto de abrangência e vai prosseguindo para níveis menores, como a Análise de Árvore de Falha (FTA), Redes de Petri (PN) e Diagrama de Blocos de Confiabilidade (RBD). Já as *bottom-up* são usadas para começar a analisar modos de falhas de níveis mais baixos e análises mais específicas para após isso, estender e determinar o efeito de forma mais abrangente. A FMEA encontra-se dentro das técnicas *bottom-up*, assim como a Análise de Perigo e Operabilidade (HAZOP), dentre outras. Dentro dessa classificação também são definidos técnicas com o objetivo qualitativo e quantitativo, onde o objetivo qualitativo consiste na identificação de todos os modos de falha, as conseqüências, as causas da falha e o plano de ação para corrigir as mesmas (LIRA, 2017). Nesse sentido, a FMEA torna-se uma análise qualitativa que mais se destaca dentre as demais, que possuem o mesmo objetivo. Por esse motivo foi definido usar a FMEA como a única técnica utilizada no trabalho, visto que essa técnica aborda de forma *bottom-up* a falha, ou seja, analisa um subsistema ou componente crítico em particular de uma determinada máquina, garantindo assim o funcionamento correto da máquina como um todo.

Além disso, outra justificativa para usar a análise de falhas em componentes mecânicos são os índices de disponibilidade operacional que demonstram paradas nos processos de produção e reforçam a tarefa de analisar as causas dessas paradas. Nesse contexto, o estudo proposto neste trabalho é de grande interesse visto que as informações obtidas e fornecidas por meio deste irão melhorar os processos tanto de operação quanto de manutenção, a fim de

melhorar índices de disponibilidade da produção e conseqüentemente diminuir custos para a organização em estudo.

A escolha do componente mecânico foi definida juntamente com a empresa devido à reincidência da falha, visto que o superaquecimento do mesmo mancal ocorreu mais de uma vez no ano. Além da reincidência, o mancal de rolamento é considerado um componente crítico dentro do processo tendo em vista que ele trabalha em conjunto com um rolo fundamental para o pleno funcionamento da máquina. Esse rolo está localizado no processo inicial da produção do papel, logo na entrada da massa de papel na máquina. Qualquer falha nesse rolo (conseqüentemente no mancal) faz a linha de produção inteira parar. Então a necessidade de prevenir falhas em componentes como estes é de fundamental importância para a empresa.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção apresenta-se o objetivo geral do trabalho, seguido pelos objetivos específicos.

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é analisar e prevenir, através da FMEA, a reincidência das falhas no componente mecânico - mancal de rolamentos – do rolo cabeceira da máquina de papel para evitar paradas não programadas na linha de produção.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os seguintes objetivos específicos direcionam o presente trabalho a alcançar o objetivo geral:

- Detalhamento da máquina à qual pertence o componente em estudo;
- Levantamento do projeto nominal de funcionamento do mancal, segundo o fabricante;
- Análise das falhas no mancal de rolamento autocompensador de rolos por meio da FMEA;
- Apresentação de proposta de possível melhoria da máquina/equipamento identificado para prevenção de ações corretivas.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em 5 capítulos. No capítulo 1, encontra-se a introdução que aborda a motivação, oportunidade de pesquisa, justificativa e objetivos do trabalho. O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para entender a proposta de solução do problema (oportunidade de pesquisa), começando pela definição de manutenção preventiva e disponibilidade e em seguida, relacionando-as com custos de manutenção dentro de uma empresa. Logo após, aborda-se a FMEA, detalha-se os modos de falhas, causas, efeitos, e índices necessários para a compreensão da sua elaboração. Por fim, detalha-se o componente mecânico em estudo, mancal de rolamento de rolos e quais os principais tipos e diferenças entre eles. No capítulo 3 apresentam-se os aspectos metodológicos da coleta de dados para a elaboração da proposta de solução do problema em questão. No capítulo 4 aborda-se os resultados e discussões da análise, evidenciando a principal causa das falhas e como ela será tratada para melhorar a disponibilidade do sistema em estudo. No capítulo 5 discute-se e mostra as conclusões e futuros trabalhos. Finalmente, seguem-se as referências utilizadas para apoiar o trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo foi dividido em 4 subseções. A subseção 2.1 traz uma síntese sobre a manutenção preventiva e sua importância dentro das empresas assim como os indicadores de desempenho, como a disponibilidade. Na seção 2.2 relaciona-se esse indicador de disponibilidade com os custos, evidenciando seu impacto no financeiro da empresa. Na sequência, na seção 2.3, apresenta-se o que é a FMEA e ramifica-se em várias partes, detalhando cada uma das suas seções para melhor entendimento do mesmo. Finalmente, na seção 2.4, mostra-se conceitos e tipos de mancais de rolamentos.

2.1 MANUTENÇÃO PREVENTIVA E DISPONIBILIDADE

Com a invenção das primeiras máquinas a vapor, foi surgindo a necessidade de reparos das máquinas industriais. O conceito era baseado em apenas manutenção corretiva não planejada, corrigindo o problema apenas com a sua perda de função (quebra ou avaria catastrófica). Essa por sua vez, pode ser dividida em não planejada e planejada. A corretiva não planejada caracteriza-se pela falta de preparo do serviço, por falta de tempo, sendo realizado um serviço emergencial. O equipamento que apresentou falha e teve que ser interrompido abruptamente, pode comprometer a qualidade dos outros que vinham operando adequadamente. Já a manutenção corretiva planejada é a correção por decisão gerencial, quando há conhecimento da falha que pode ocorrer, e faz-se um planejamento para quando ocorrer de fato (KARDEC; NASCIF, 2012; SIQUEIRA, 2009).

Após a Segunda Guerra Mundial, a indústria teve um grande crescimento e o bom desempenho das máquinas tornou-se essencial. Era cada vez mais importante evitar as falhas dos equipamentos, garantir a produtividade, confiabilidade e disponibilidade sem que isso aumentasse os custos. Nesse contexto, surgiu uma manutenção que visava diminuir os custos de falhas e estava centrada em prevenir as falhas funcionais. Essa manutenção deixava de fazer apenas a manutenção corretiva e começava a implantar a manutenção preventiva e preditiva (KARDEC; NASCIF, 2012).

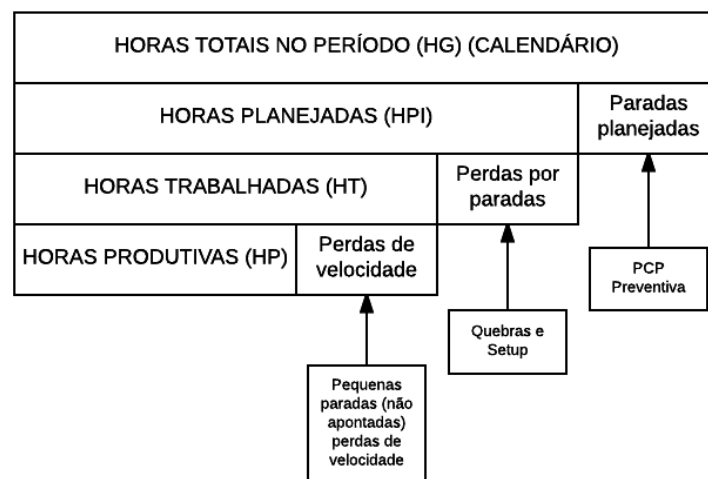
A manutenção preditiva é associada ao termo predizer, ou seja, tem por objetivo prever possíveis falhas nos equipamentos e ainda, sem parar sua produção. É realizada com base em mudança de condições e parâmetros, e quando há necessidade de intervenção, o serviço de reparo já pode ser preparado com antecedência. Essa manutenção irá reduzir a ocorrência de

falhas, que além de proporcionar segurança, reduz paradas que implicam em prejuízos. Esse tipo de manutenção prevê coleta de dados, como coleta de vibração, termografia, análise de óleo, ultrassom, etc. que posteriormente são analisados e podem alimentar a manutenção preventiva, para realizar uma intervenção preventiva baseada na condição (KARDEC; NASCIF, 2012).

A manutenção preventiva, ao contrário da manutenção corretiva, procura evitar que as falhas ocorram, ou seja, procura prevenir. A preventiva se faz necessária, seja por troca de componentes prematuramente, ou pela intervenção antes de completar o período estimado para ocorrência de outra falha. Todavia, existem pontos negativos pela necessidade de parar o equipamento para a realização do serviço de troca ou intervenção (KARDEC; NASCIF, 2012).

De acordo com a norma da ABNT NBR 5462:1994, disponibilidade operacional é entendida como “a capacidade de um elemento estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado”. Esse conceito pode ser melhor entendido observando a Figura 1.

Figura 1 – Disponibilidade operacional.



Fonte: VIANA, 2002.

Segundo Kardec e Nascif (2009), disponibilidade pode ser definida como a relação entre o tempo médio entre manutenções (TMEM) e o tempo médio de paradas (TMP), ou seja, da forma a seguir:

$$\text{Disponibilidade operacional} = \frac{TMEM}{TMEM + TMP} \times 100\% \quad (1)$$

Onde o TMP inclui o tempo médio para reparo, tempo referente à espera, atrasos, paradas programadas e/ou emergenciais, etc. (KARDEC; NASCIF, 2009).

Percebe-se que esse índice é de extrema importância para a manutenção e gestão dos ativos físicos de uma organização, pois possibilita verificar o comportamento de cada máquina, evidenciando quais equipamentos possuem maior probabilidade de desempenharem suas funções requeridas em qualquer intervalo de tempo pré-determinado.

Esse uso de indicadores auxilia na gestão de manutenção para evitar falhas e perdas que acarretem altos custos de manutenção. Após a detecção dos problemas é necessário identificar quais são os modos de falhas, seus efeitos e a causa raiz, para que enfim se encontre uma forma de prevenir e solucionar os problemas (SIQUEIRA, 2009).

2.2 DISPONIBILIDADE OPERACIONAL RELACIONADA COM CUSTO

A falta da gestão de ativos pode gerar diversos problemas como redução da vida útil do maquinário industrial, queda na qualidade dos produtos fabricados, risco a segurança dos funcionários, maior demanda de trabalho e o aumento dos custos e despesas e diminuição dos lucros empresariais. Para que a empresa possa apresentar um produto acessível ao mercado, melhorar a competitividade com qualidade e preço, é necessária eficiência na área produtiva. Quanto mais as máquinas estiverem em constante funcionamento, sem anomalias, maior será a produtividade (MOTORLUB, 2016).

Existem diferentes tipos de custos: custos diretos, custos indiretos e custos induzidos. Custos diretos são mão de obra, ferramentas, peças de reposição. Custos indiretos são oriundos de depreciação de equipamentos e gerados quando um equipamento quebra e deixa de produzir, deixando de gerar lucratividade para a empresa. Custos induzidos podem ser perda de clientes, custos derivados de entrega atrasada ao cliente (caso esse atraso seja decorrente de falhas que resultou no atraso da produção), problemas de qualidade, entre outros. Esses três tipos de custos impactam diretamente nos resultados da empresa e custos de manutenção, sendo muitas vezes confundido e erroneamente tidos como gastos, ao invés de investimento, já que a manutenção prolonga a vida útil dos equipamentos (POMPERMAYER, 1999; TELES, 2017).

É preciso estar ciente de que existem outros indicadores tangíveis além da disponibilidade que impactam nos custos da manutenção. Esses indicadores podem ser avaliados e monitorados dentro de uma empresa para controlar esses custos. Na Tabela 1 encontra-se uma relação de todos esses indicadores (PERES; LIMA, 2008).

Tabela 1 - Indicadores que impactam nos custos da manutenção

Custo total da manutenção	Custo com serviços	Custo com materiais	MTBF	MTTR
Nº de intervenções de OPL	Nº de substituições de itens por equipamentos	<i>Backlog</i>	Hh treinamento em equipamentos críticos	Eficiência de programação
Nº de acidentes com afastamento	Porcentagem de materiais importados	Porcentagem de conjuntos em estoque	Nº de itens zerados no estoque	Nº de itens comprados por compra direta
Nº de documentação técnica inadequada	Porcentagem de cumprimento de plano preventivo de manutenção	Porcentagem de intervenções assertivas do fornecedor	Porcentagem de intervenção preditiva monitorada	Dificuldade de execução de atividades causadas por ferramentas
HE	Padronização de materiais	Nº de atividades temporárias	Absenteísmo	Retrabalhos
<i>Turn-over</i>				

Fonte: PERES; LIMA, 2008.

Esses são indicadores que impactam diretamente nos custos da manutenção e também na disponibilidade. Por exemplo, dificuldade de execução das atividades causadas por ferramentas. Se as mesmas não estiverem adequadas ou estiverem estragadas irão impactar na manutenção, tanto por dificuldade e esforço maior para a execução das atividades, tanto quanto a compra de novos materiais adequados. Documentação técnica inadequada também causa impacto, visto que se os dados técnicos e a documentação estiverem incorretos muitas vezes serão comprados itens e materiais que não estarão de acordo com as necessidades, não realizando a função necessária e acarretando na disponibilidade da máquina.

2.3 ANÁLISE DE EFEITOS E MODOS DE FALHA (FMEA)

Garantir qualidade de manutenção e produção implica em excelência em processo e projetos. Para auxiliar nesse quesito, existem técnicas e metodologias para analisar falhas como a FMEA e/ou FMECA. As duas consistem no mesmo princípio de análise de falhas, sendo genericamente chamadas apenas de FMEA. A única diferença entre as duas é que a FMECA agrega um índice de criticidade que orienta a prioridade nas ações, ou seja, a FMECA é uma FMEA junto com uma análise de criticidade. Enquanto a FMECA é um método quantitativo, a FMEA é mais qualitativa (FOGLIATTO, 2009; DIAS, 2011).

FMEA é uma técnica que ajuda a identificar e priorizar falhas potenciais e funcionais em equipamentos, sistemas ou processos. Ela hierarquiza as falhas potenciais e fornece ações

corretivas, ou seja, determina o efeito de cada uma delas e identifica os pontos críticos. Também pode classificar cada falha de acordo com a criticidade dela e sua probabilidade de ocorrência. (KARDEC; NASCIF, 2012; BRANCO, 2010).

FMEA avalia a severidade de cada falha, sua probabilidade de ocorrência e de detecção. Com base nestes três elementos, a FMEA leva à priorização de quais modos de falha acarretam os maiores riscos ao equipamento e que, portanto, merecem atenção maior.

2.3.1 MODOS DE FALHAS

Segundo a Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC - do inglês *International Electrotechnical Commission*), modo de falha é definido como a maneira em que ocorrem as falhas, onde falha pode ser definida como a perda de função requerida. Enquanto a falha é associada à função do sistema, o modo de falha é associado ao evento que provoca a transição para o estado de falha (SIQUEIRA, 2009).

Para Callister e Rethwisch (2012) os principais tipos de modos de falhas para elementos mecânicos são:

- Deformação elástica/plástica por esforço e/ou temperatura: ocorre quando a deformação elástica/plástica do elemento é suficientemente elevada, a ponto de prejudicar ou impedir o perfeito funcionamento do equipamento.
- Indentação: é a falha que ocorre quando forças estáticas, em superfícies curvas, resultam em escoamento de um ou de ambos os componentes acoplados.
- Fratura: ocorre quando a deformação plástica (para materiais dúcteis) ou elástica (para materiais frágeis) é conduzida ao extremo, de modo que as ligações interatômicas são quebradas e o componente se separa em duas ou mais partes.
- Fadiga: fratura de um componente em duas ou mais partes, resultado da aplicação de ciclos de cargas ou deformações variáveis por um período de tempo.
- Corrosão: implica da inutilização de uma peça em função de deterioração não desejada do material, em função de interação química ou eletroquímica com o ambiente. As formas de corrosão compreendem: ataque químico direto; corrosão galvânica; corrosão por fenda; corrosão por pites; corrosão intergranular, biocorrosão, entre outras.
- Desgaste: mudança cumulativa nas dimensões causada pela remoção de material de superfícies em contato usualmente deslizantes. Pode se desenvolver pelos diferentes processos

como: desgaste adesivo; desgaste abrasivo; desgaste corrosivo; desgaste por fadiga superficial; desgaste por deformação; desgaste por impacto.

- Relaxação térmica: ocorre quando as variações dimensionais, devido à fluência, resultam na relaxação do componente pré-deformado ou pré-tensionado.

- Desagregação: é quando uma partícula é desalojada espontaneamente da superfície de uma peça de máquina, de modo a impedir o funcionamento apropriado do componente.

De modo mais específico para a indústria, essas falhas podem ser: fratura da caixa de mancal, folga excessiva no mancal, ruptura, empenamento, desalinhamento, desbalanceamento, corrosão, encurtamento, montagem mal feita, ruptura da trava, fissura, lascamento, afrouxamento da trava, etc.

2.3.2 CAUSAS DE FALHAS E EFEITOS

De modo geral, causa é definida como aquilo que determina a existência de uma coisa; o que determina um acontecimento; agente, motivo, razão; origem, princípio (MICHAELIS, 2000).

Alguns exemplos de causas principais de falha são:

- Fluência: é a falha que ocorre sempre que a deformação plástica em um componente de máquina se acumula durante um período de tempo sob influência de tensão e temperatura.

- Choque térmico: a deformação térmica gerada excede a habilidade do material em sustentá-la sem escoamento ou fratura.

- Flambagem: uma combinação crítica de ações (compressão) e/ou ponto de aplicação, juntamente com o perfil geométrico do elemento, faz com que haja deflexão repentina.

- Impacto: quando o componente é submetido a carregamentos não-estáticos que produzem na peça tensões ou deformações de tal magnitude, de modo que o componente não é mais capaz de desempenhar a sua função.

- Dano por radiação: ocorre quando as alterações causadas pela exposição a um campo de radiação são de tal tipo e magnitude que a peça não desempenha mais a sua função.

Além disso, segundo Siqueira (2009), causas em componentes mecânicos são: propagação de trincas por ciclos térmicos, remoção de material por atrito, remoção de material por micro movimentos e erro de montagem.

A identificação das causas e modos de falhas é um passo essencial para a solução e prevenção das mesmas, para garantir a boa qualidade das máquinas. Por exemplo, se a máquina

está com problemas no rolamento, onde o mesmo está causando aumento de vibração, ruído e aquecimento, um possível modo de falha pode ser indentação. Nele, uma esfera do rolamento pode estar carregada estaticamente, de modo que ela seja forçada a indentar (marcar) permanentemente a pista de rolamento, resultando na vibração, aquecimento e ruído relatado.

Outro exemplo são os parafusos pré-tensionados de uma flange de um vaso de pressão de alta temperatura. Eles podem relaxar (modo de falha relaxação térmica) devido à fluência (causa) dos parafusos, de modo que os picos de pressão excedam a pré-carga do parafuso violando o selo da flange e vindo a falhar (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Diante disso, também é possível definir o que são efeitos dos modos de falha. São os resultados produzidos quando estes vêm a ocorrer, ou seja, são as consequências do modo de falha. Em outras palavras, o efeito é o impacto do modo de falha (SAKURADA, 2001).

2.3.3 CLASSIFICAÇÃO DA ANÁLISE DE EFEITOS E MODOS DE FALHAS

Para desenvolver a FMEA, precisa-se levar em conta certos índices para definir a prioridade da resolução de cada falha. Dentro desses índices, encontram-se os índices de Severidade, Ocorrência, Detecção e Risco (STONNER, 2016; SILVEIRA, 2017).

2.3.3.1 Severidade

Severidade é um índice que fornece o quão grave é uma falha, sendo zero a gravidade mínima e dez a gravidade máxima. Esse índice pode ser exemplificado pela Tabela 2.

Tabela 2 - Severidade

Falha	Pontuação	Critério
Marginal	1	Falha sem efeito perceptível
Baixa	2	Falhas leves, com pequenos transtornos e variações no desempenho
	3	
	4	
Moderada	5	Falha no desempenho e deteriorização perceptível no sistema
	6	
Alta	7	Sistema não operacional, falha ainda não envolve riscos à segurança operacional ou não cumprimento de exigências legais
	8	
Muito alta	9	Risco potencial de segurança e problemas graves de não-conformidades
	10	

Fonte: STONNER, 2016.

2.3.3.2 Ocorrência

Ocorrência são quantas vezes a falha acontece, ou seja, a probabilidade de ocorrência da causa da falha. Esse índice está exemplificado na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Ocorrência

Pontuação	Critério
1	Chance Remota de Falha
2	Frequência muito baixa: 1 vez a cada 5 anos
3	Pouco frequente: 1 vez a cada 2 anos
4	Frequência baixa: 1 vez por ano
5	Frequência ocasional: 1 vez por semestre
6	Frequência moderada: 1 vez por mês
7	Frequente: 1 vez por semana
8	Frequência elevada: algumas vezes por semana
9	Frequência muito elevada: 1 vez ao dia
10	Frequência máxima: várias vezes ao dia

Fonte: SILVEIRA, 2017.

2.3.3.3 Detecção

Detecção é a probabilidade de detectar a falha antes dela ocorrer. Esse índice encontra-se exemplificado na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 - Detecção

Pontuação	Critério
1	Detecção quase certa do modo de falha
2	Probabilidade muito alta de detecção do modo de falha
3	Alta probabilidade de detecção do modo de falha
4	Moderadamente alta probabilidade de detecção do modo de falha
5	Moderada probabilidade de detecção do modo de falha
6	Baixa probabilidade de detecção do modo de falha
7	Probabilidade muito baixa de detecção do modo de falha
8	Probabilidade remota de detecção do modo de falha
9	Probabilidade muito remota de detecção do modo de falha
10	Não é possível detectar o modo de falha

Fonte: SILVEIRA, 2017.

2.3.3.4 Risco

A multiplicação dos três índices anteriores, severidade, ocorrência e detecção irão fornecer o risco associado a cada modo de falha. Se o risco for menor que 125 ele será aceitável. Caso o risco seja maior ou igual que 125, e menor ou igual a 200, uma redução do mesmo é desejável. Por fim, se o risco for maior que 200, entrará na classificação inaceitável, devendo

ser prioridade na resolução de problemas e será necessário realizar ações para reduzir esse risco (STONNER, 2016; SILVEIRA, 2017).

Como essas classificações são subjetivas e dependem do conhecimento de quem está realizando a análise, não é necessariamente uma regra a ser seguida, podendo também variar de autor para autor.

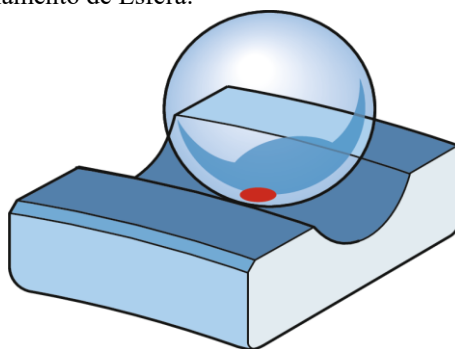
2.4 MANCAIS DE ROLAMENTOS

Mancas de Rolamentos são suportes mecânicos montados em eixos, usados para tornar o movimento rotacional mais fácil, reduzir o atrito/fricção entre partes rotativas e estacionárias e suportar cargas. Os rolamentos oferecem alta precisão e baixo atrito, permitindo velocidades de rotação altas, enquanto diminui o ruído entre as partes, calor, consumo de energia e desgaste (GENEROSO, 2009).

2.4.1 ROLAMENTOS DE ESFERAS E DE ROLOS CILÍNDRICOS

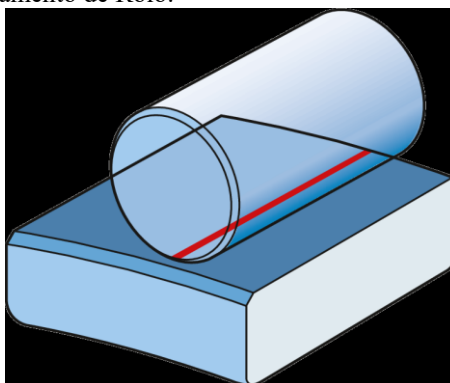
Os dois tipos básicos de rolamentos distinguem-se de acordo com o elemento rolante, que pode ser de esferas ou de rolos cilíndricos. Esferas e rolos cilíndricos são diferentes na forma de contato com a pista, sendo o contato pontual para esferas e contato linear para os rolos cilíndricos.

Figura 2 – Rolamento de Esfera.



Fonte: SKF, 2001.

Figura 3 – Rolamento de Rolo.



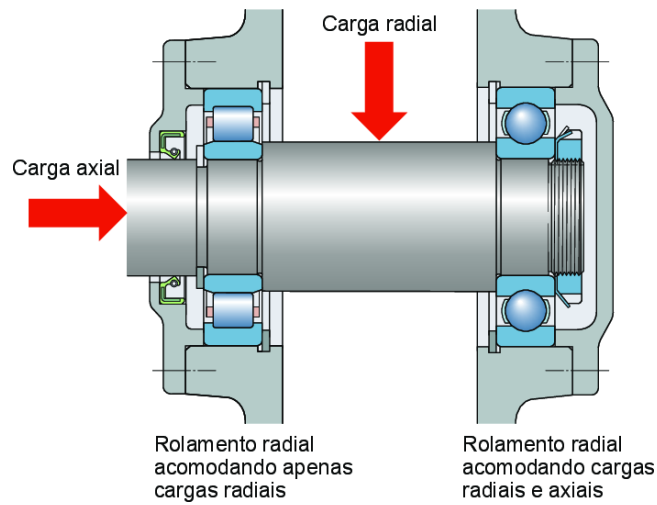
Fonte: SKF, 2001.

Nas Figuras 2 e 3 pode-se observar a diferença na área de contato. No elemento rolante de esfera o ponto de contato torna-se uma área elíptica (Figura 2) e faz com que tenha baixo atrito visto que a área de contato é pequena, permitindo suportar altas velocidades, mas com um limite para a capacidade da carga. Já no elemento rolante de rolos cilíndricos, a área de contato torna-se uma área retangular (Figura 3), e conseqüentemente, suporta velocidades mais baixas e cargas maiores (MENNA, 2007).

2.4.2 *ROLAMENTOS RADIAIS E AXIAIS*

Os rolamentos também são classificados com base na direção da carga, podendo ser axial ou radial. Rolamentos radiais acomodam cargas perpendiculares ao eixo. Existem os rolamentos radiais que suportam apenas cargas puramente radiais, outros que suportam também cargas axiais em uma direção, e em alguns casos, em ambas as direções (SKF, 2001).

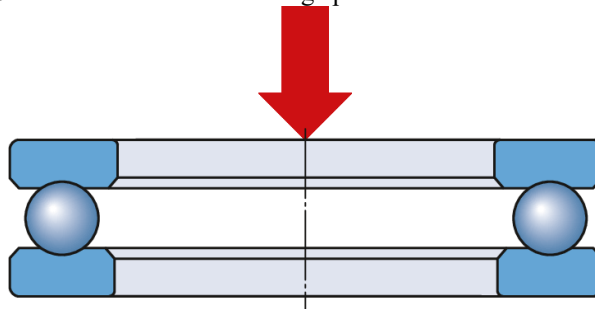
Figura 4 – Rolamentos radiais.



Fonte: SKF, 2001.

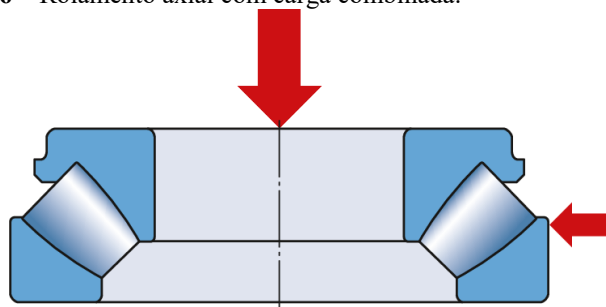
Os rolamentos axiais suportam cargas que atuam ao longo do eixo. Alguns rolamentos axiais suportam cargas puramente axiais em uma ou ambas as direções (Figura 5), e outros também podem suportar cargas combinadas, ou seja, axiais e radiais (Figura 6). Rolamentos axiais não suportam velocidades tão altas em relação aos os radiais.

Figura 5 – Rolamento axial com carga puramente axial.



Fonte: SKF, 2001.

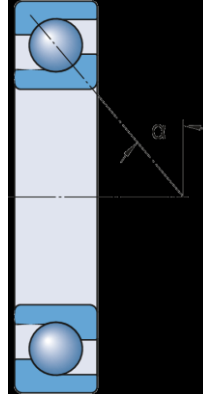
Figura 6 – Rolamento axial com carga combinada.



Fonte: SKF, 2001.

O ângulo de contato da Figura 7 que determina se o rolamento é axial ou radial. Se esse ângulo for menor ou igual a 45° é radial, caso contrário é axial.

Figura 7 – Ângulo de Contato

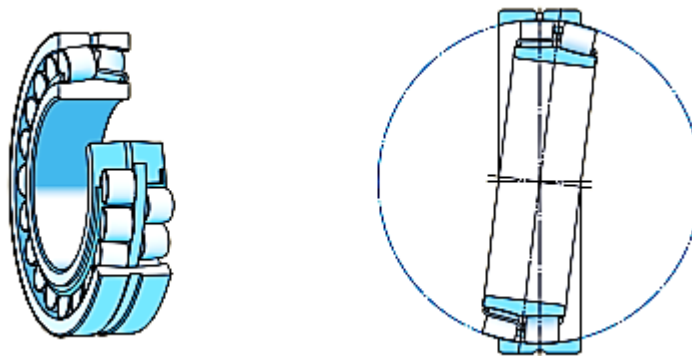


Fonte: SKF, 2001.

2.4.3 *ROLAMENTOS AUTOCOMPENSADORES DE ROLOS*

Os rolamentos autocompensadores de rolos possuem duas carreiras de rolos com uma pista esférica comum no anel externo e duas pistas no anel interno inclinadas em um ângulo em relação ao eixo do rolamento. Esses rolamentos são insensíveis ao desalinhamento do eixo em relação ao mancal, tendo em vista que eles compensam esse desalinhamento (Figura 8) que pode ser causado, por exemplo, por deflexão do eixo. Os rolamentos autocompensadores de rolos são projetados para acomodar cargas radiais pesadas, assim como cargas axiais pesadas em ambas as direções (SKF, 2001).

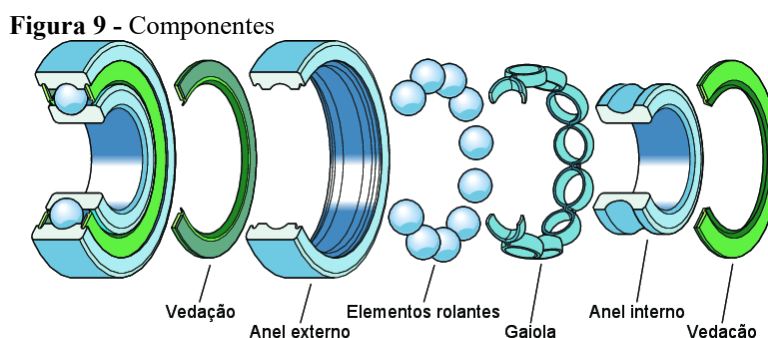
Figura 8 – Rolamento autocompensador de rolos



Fonte: SKF, 2001.

2.4.4 COMPONENTES E MATERIAIS

Um rolamento tipicamente é composto por anel interno, anel externo, elemento rolante (esfera ou rolos) e uma gaiola. Existem também rolamentos tampados com uma vedação ou uma placa de proteção.



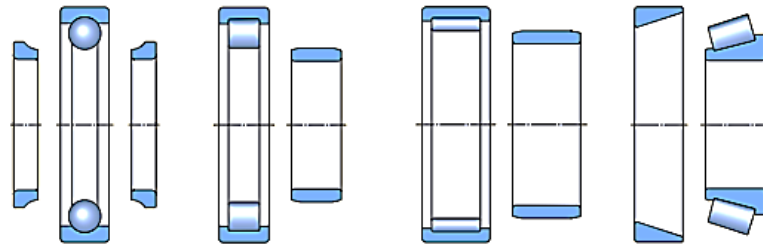
Fonte: SKF, 2001.

Os elementos rolantes transferem a carga de um anel para o outro. Esses anéis suportam a pressão na área de contato e devem ser de aço temperado (padrão 100Cr6 com aproximadamente 1% carbono e 1,5% cromo). Já as gaiolas têm como função separar os elementos rolantes para reduzir o calor de atrito gerado, guiar e manter a distribuição uniforme dos elementos rolantes e reter os elementos quando um anel é removido durante uma montagem ou desmontagem (SKF, 2001).

Os rolamentos autocompensadores de rolos são submetidos a um tratamento térmico especial e são estabilizados ao calor para uso em temperaturas de até 200 °C por pelo menos 2500 horas ou por períodos mais curtos em temperaturas mais elevadas (SKF, 2001).

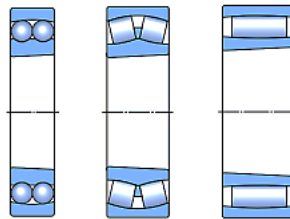
2.4.5 MONTAGEM E DESMONTAGEM

Os rolamentos para eixos cilíndricos (Figura 10) são mais fáceis de montar e desmontar quando são do tipo separável. São preferíveis quando é frequente a desmontagem e montagem, porque o anel com corpos rolantes e a gaiola desses rolamentos separáveis, podem ser ajustados, independente do outro anel.

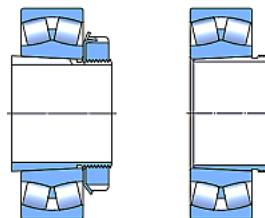
Figura 10 – Furos cilíndricos

Fonte: SKF, 2001.

Já rolamentos de furo cônico (Figura 11) podem ser montados facilmente em um assento do eixo, por meio de uma bucha de fixação.

Figura 11 – Furo cônico

Fonte: SKF, 2001.

Figura 12 – Montagem por meio de uma bucha de fixação

Fonte: SKF, 2001.

A fabricante de rolamentos SKF recomenda que os rolamentos autocompensadores de rolos sejam montados quando o eixo ou o mancal se encontrar na posição horizontal. Se eles forem montados quando estiver na posição vertical, o conjunto de rolos e os anéis serão movidos para baixo até que não haja mais folga. Depois, quando os anéis expandirem ou

contraírem em função de um ajuste interferente, deve ocorrer uma pré-carga que não é desejada, visto que pode influenciar na vida do rolamento. Os rolamentos de furo cônico são sempre montados com um ajuste interferente.

2.4.6 VIDA ÚTIL DO ROLAMENTO

A vida útil do rolamento é definida como o número de rotações (ou o número de horas de operação) em uma determinada velocidade que o rolamento pode suportar antes de o primeiro sinal de fadiga de metal (lascamento) aparecer em um elemento rolante ou na pista do anel interno ou externo.

Testes realizados pela SKF em rolamentos idênticos sob condições idênticas de operação apresentam uma grande variação, por isso a estimativa de vida útil com base na fadiga não é suficientemente precisa. Uma abordagem estatística é necessária para determinar qual o tamanho do rolamento.

A vida útil à fadiga que se espera em 90% dos testes com rolamentos idênticos funcionando em condições operacionais idênticas é chamada de vida nominal básica (L_{10}). Esse cálculo da vida nominal pode ser comparado com diretrizes relacionadas à especificação de vida útil de várias aplicações, fornecidas na Figura 13 (SKF, 2001).

Figura 13 – Valores de referência de especificação de vida útil para diferentes tipos de máquina

Tipo de máquina	Especificação da vida útil Horas operacionais
Máquinas domésticas, máquinas agrícolas, instrumentos, equipamento técnico para uso médico	300 ... 3 000
Máquinas usadas por períodos curtos ou intermitentemente: ferramentas elétricas manuais, guincho de elevação em oficinas, equipamentos e máquinas de construção	3 000 ... 8 000
Máquinas usadas por períodos curtos ou intermitentemente, onde é necessária uma alta confiabilidade operacional: elevadores, guindastes para mercadorias embaladas ou cabos de suspensão de tambores, etc.	8 000 ... 12 000
Máquinas para uso durante oito horas por dia, mas nem sempre totalmente utilizadas: transmissões de engrenagens para finalidades gerais, motores elétricos para uso industrial, trituradores rotativos	10 000 ... 25 000
Máquinas para uso durante oito horas por dia e utilizadas por completo: máquinas-ferramenta, máquinas para trabalho em madeira, máquinas para o setor de engenharia, guindastes para material a granel, ventiladores, esteiras transportadoras, equipamentos de impressão, separadores e centrífugas	20 000 ... 30 000
Máquinas para uso contínuo durante 24 horas: unidades de engrenagens de laminadores, máquinas elétricas de médio porte, compressores, elevadores de minas, bombas, máquinas têxteis	40 000 ... 50 000
Máquinas de energia eólica, que incluem eixo principal, guinada, redutores de engrenagens de afastamento, rolamentos de geradores	30 000 ... 100 000
Máquinas para trabalhos com água, fornalhas rotativas, máquinas de estiramento de cabos, máquinas de propulsão para embarcações oceânicas	60 000 ... 100 000
Grandes máquinas elétricas, usina de geração de energia, bombas de minas, ventiladores de minas, rolamentos de túneis de eixos para navios oceânicos	> 100 000

Fonte: SKF, 2001.

Existe três formas para calcular a vida nominal, conforme catálogo da SKF. A primeira é a vida nominal básica, que considera apenas a carga e a velocidade. Já no cálculo de vida nominal SKF leva-se em conta uma aplicação específica, que inclui também a lubrificação, grau de contaminação, montagem adequada e outras condições ambientais. Por último existe o cálculo da vida útil de rolamentos com condições operacionais variáveis, com cargas oscilantes.

A vida nominal básica de um rolamento é definida pela ISO 281:2007 como:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (2)$$

Onde L_{10} é a vida nominal básica por milhões de revolução. C é a classificação de carga dinâmica básica, P é a carga dinâmica equivalente e p é o expoente da equação de vida (3 para rolamentos de esfera e 10/3 para rolamentos de rolos) (SKF, 2001).

Se a velocidade for constante, é preferível expressar a vida em horas de operação:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 n} L_{10} \quad (3)$$

Onde L_{10h} é a vida nominal básica por horas operacionais e n é a rotação.

Para cargas axiais e radiais combinadas, tem-se:

$$\text{Se } \frac{F_a}{F_r} \leq e \quad P = F_r + YF_a \quad (4)$$

$$\text{Se } \frac{F_a}{F_r} > e \quad P = 0,67F_r + YF_a \quad (5)$$

Para o cálculo da vida nominal SKF, é utilizado um fator de vida útil modificado para complementar a vida nominal básica. Esse fator de modificação de vida SKF, a_{SKF} aplica o mesmo conceito de um limite de carga de fadiga, P_u . Esse limite de carga de fadiga é listado. Já o fator de modificação de vida SKF considera condições de lubrificação (viscosidade k), nível de carga em relação ao limite de carga de fadiga e um fator para o nível de contaminação (hc). Assim:

$$L_{nm} = a_1 a_{SKF} L_{10} \quad (6)$$

Se a velocidade for constante, a vida útil poderá ser expressa em horas de funcionamento utilizando:

$$L_{nmh} = \frac{10^6}{60 n} L_{nm} \quad (7)$$

Onde a_1 é o fator de ajuste de vida para confiabilidade (para 90% de confiabilidade $a_1 = 1$).

3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

O método de pesquisa em campo utilizado apoia-se em técnicas de coleta de dados quantitativos e qualitativos, por meio do levantamento histórico das máquinas que compõem o processo produtivo da empresa em estudo, além de pesquisa bibliográfica. Essas técnicas consistem basicamente em acompanhamento periódico e presencial das máquinas, avaliando juntamente com a empresa quando ocorrem as falhas e de que forma elas se apresentam.

A definição da máquina e equipamento em estudo é definida pela empresa. Essa escolha do equipamento será baseada em dados da empresa relacionados a indicadores dentro da manutenção e da engenharia, visto que a empresa já possui planos de manutenção para agregar a coleta e análise de criticidade. Os dados da empresa em relação a falhas de equipamentos, em conjunto com essa criticidade dentro da linha de produção (já definida pela empresa), foram os principais instrumentos para a definição do equipamento a ser analisado.

O equipamento definido pela empresa foi o mancal do rolo cabeceira da máquina de papel da empresa em questão. Esse mancal está localizado no rolo cabeceira, dentro do processo de formação da folha de papel. Foi realizada uma análise da ocorrência das falhas, por meio da técnica de FMEA, que usa critérios específicos para classificar os modos mais relevantes nos componentes da máquina em estudo. Assim, pode ser identificada a causa raiz e propor ações de mitigação de falhas. Essas propostas de ações de melhoria serão apresentadas e solicitadas à empresa, para possível implementação e viabilização.

As etapas para a execução de FMEA são:

- 1) identificar modos de falha conhecidos e potenciais;
- 2) identificar os efeitos e severidade de cada modo de falha;
- 3) identificar as causas e probabilidade de ocorrência;
- 4) identificar os meios de detecção do modo de falha e sua probabilidade de detecção;
- 5) avaliar o potencial de risco de cada modo de falha e definir medidas para sua eliminação ou redução.

Essa execução de etapas é conseguida por ações que aumentem a probabilidade de detecção ou reduzam a probabilidade de ocorrência da falha (FERNANDES; REBELATO, 2006).

Para a identificação dos modos de falhas, foi realizado um *brainstorm* na empresa e foram levantadas as possibilidades de causas e colocadas dentro de um diagrama de Ishikawa,

que apenas identifica as causas de acordo com as categorias, que basicamente tem relação com qual parte do processo que ela gerou aquela causa.

Realizado esse *brainstorm* e elencado as principais causas prováveis, foi realizada a análise FMEA. Um modelo de FMEA, para uso nesse trabalho de conclusão de curso, foi adaptado da norma ISO 13379-1:2012 e encontra-se preenchido no Apêndice A.

Também foi calculado uma estimativa de vida útil para o rolamento, para se ter uma base de expectativa de vida que o rolamento deveria atingir. Embora não se tenha conhecimento das cargas verdadeiras que o rolamento sofre, estimou-se e definiu alguns parâmetros para se basear em um número de horas operacionais e analisar se atingiu o esperado ou não.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 APRESENTAÇÃO DA FALHA

A empresa na qual foi realizado o estudo de caso é uma empresa de Papel e Celulose presente na região centro-oeste do Paraná. Essa empresa atua também nas áreas de agronegócio, geração de energia e reflorestadora. Está no mercado a mais de 50 anos e conta com duas hidrelétricas, um parque florestal com 12 mil hectares de floresta com plantação de pinus, 7 mil hectares de mata nativa (áreas de preservação e reservas legais) e investimentos no setor agrícola. Conta com duas máquinas de papel e um coater para a produção dos mais variados tipos de papéis de fibra curta. A linha de papéis é composta por produtos offset, apergaminhados, monolúcido, kraft branco, aperfeiçoados para impressão a laser e formulário contínuo. É uma empresa que produz sementes e mudas, além do setor agrícola, desde o plantio e beneficiamento até a armazenagem de grãos, em estrutura própria. Atualmente a empresa conta com mais de 800 colaboradores e produz em média 110 toneladas de papel por dia na máquina de papel do estudo de caso.

O componente em estudo (Mancal de rolamento), pertence a uma máquina de papel da marca Voith, fabricada em 1986. Ela é dividida em basicamente: caixa de entrada, prensa, seção de secagem, aplicador, calandra, desenrolamento (ou enroladeira) e cortador de rolo (ou rebobinadeira), conforme Figura 14.



Fonte: Voith.

A caixa de entrada tem a função de levar a massa (preparada em desagregadores e refinadores) para a tela formadora. Na tela formadora, a massa é transformada em uma folha, enquanto a tela cria uma turbulência para eliminar a floculação das fibras, garantindo uma boa, homogênea e consistente formação da folha de papel.

Na prensa, a folha de papel é prensada entre vários rolos para eliminar a umidade da folha de papel, influenciando também a espessura e volume, além de garantir a superfície lisa

e de alta qualidade. Na seção de secagem, o papel passa por cilindros secadores que tem a função de secar a folha, retirando e evaporando ainda mais a umidade com o vapor quente, restando aproximadamente de 2 a 9 % de umidade.

Quando necessário, são aplicados revestimentos para melhorar a superfície, fechando os poros ainda existentes e cobrindo a superfície. Na calandra, o papel adquire lisura e brilho. No desenrolamento/enrolamento o papel é enrolado em estangas até atingir o diâmetro máximo e então troca-se a estanga automaticamente. E por fim, no cortador de rolos (rebobinadeira), transformam-se os rolos, que vem da enroladeira, em rolos mais estreitos e com diâmetros adaptados, conforme necessidade de clientes.

A tela formadora da caixa de entrada é sustentada por vários rolos, sendo um deles o rolo Cabeceira (mostrado nas Figuras 15, 16 e 17). Esse rolo fica localizado na ponta da caixa de entrada, por isso sendo chamado de Cabeceira. Atrelado a esse rolo, existe um conjunto sacudidor, cuja função é literalmente sacudir o rolo, assim como toda a estrutura da tela formadora, para criar a turbulência necessária para homogeneizar a formação da folha de papel.

Figura 15 – Sacudidor e rolo cabeceira ao fundo (lado LA)



Fonte: O próprio autor.

Figura 16 – Rolo cabeceira lado LC



Fonte: O próprio autor.

A empresa possui um plantão mecânico que se divide em 3 turnos para corrigir as falhas nos equipamentos. Num dos chamados ao plantão mecânico da fábrica que interrompeu a produção da máquina de papel, a equipe de Produção relatou que a máquina havia parado devido ao superaquecimento do mancal do Lado de Acionamento (LA) do rolo Cabeceira, rolo esse que sustenta a tela formadora, a qual recebe a massa da caixa de entrada para a produção do papel e, portanto, um rolo crítico dentro do processo produtivo.

Figura 17 – Rolo Cabeceira lado LA



Fonte: O próprio autor.

$$x = \frac{708(100)}{4,43} = 1,59 \% = 1,6 \% \quad (9)$$

Na visão geral da máquina de papel da empresa, considerando todos os processos da máquina e apenas o mês de julho, ela teve uma disponibilidade de 88,01%, apresentada na Tabela 5. Considerando apenas o processo de Formação, no mês de julho, a disponibilidade é de 97,77%.

Tabela 5 – Disponibilidade da Máquina no Mês de Julho

	Tempo/Minutos	Tempo/Horas
Perdas por Rendimentos	48	0,48
Perdas por PP	630	10,3
Falhas Administrativas - Gestão	59	0,59
Perdas por Quebras e Falhas	1562	26,02
Perda por Troca Ferramental	79	1,19
Perdas por Setup e Ajustes	935	15,35
Perdas por Defeito e Retrabalho	1350	22,3
Perdas por Pequenas Paradas	599	9,59
Perdas por Startup	89	1,29
TOTAL	5351	89,2
Tempo Disponível:	744,00	
Tempo Efetivo:	654,82	
Eficiência Funcional:	88,01%	

Fonte: Empresa.

O rolamento ficou danificado e nas Figuras 19, 20 e 21 pode-se visualizar as avarias.

Figura 19 - Rolamento



Fonte: O próprio autor.

Figura 20 - Rolamento



Fonte: O próprio autor.

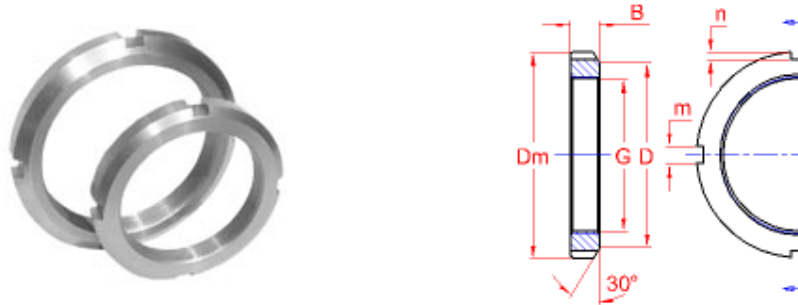
Figura 21 - Trava e porca



Fonte: O próprio autor.

4.2 DADOS

Os dados a respeito de dimensão, modelo e montagem do mancal, do rolamento e da rosca de fixação são apresentados a seguir.

Figura 24 – Porca de Fixação KM 20

Fonte: BGL, 2018.

Tabela 6 - Porca de Fixação KM 20

Dimensões:

G:	M 100x2	Medida da Rosca
Dm:	130 mm	Diâmetro Externo
B:	18 mm	Espessura
D:	120 mm	Diâmetro do Chanfro
m:	10 mm	Largura do Rasgo
n:	4 mm	Profundidade do Rasgo

Peso:

0.65 kg

Utilizada em conjunto com:

Arruela de Trava MB 20

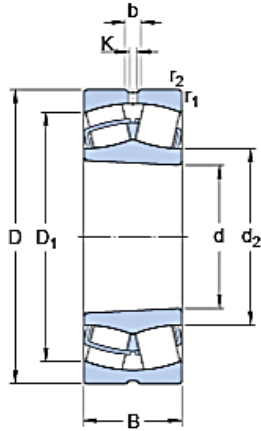
Fonte: BGL, 2018.

Conforme Figura 22 e 23 o rolamento é um rolamento autocompensador de rolos que pode ser da marca SKF e modelo 23220 CCK W33, ou da marca FAG modelo 23220 KHL. Já a porca de fixação é da marca BGL e modelo KM 20.

É utilizado o mesmo tipo de rolamento tanto para o lado LA quanto para o lado LC, sendo o lado LA fixo e o LC livre. As dimensões do rolamento SKF são mostradas a seguir.

Figura 25 – Dimensões (a)

Dimensões



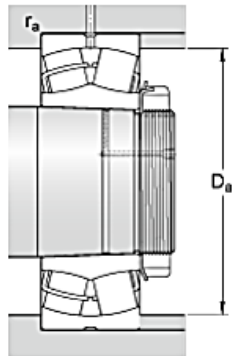
d	100	mm
D	180	mm
B	60.3	mm
d ₂	≈ 117	mm
D ₁	≈ 153	mm
b	8.3	mm
K	4.5	mm
r _{1,2}	min. 2.1	mm

Furo cônico, conicidade de 1:12

Fonte: SKF, 2001.

Figura 26 – Dimensões (b)

Dimensões do encosto



D _a	max. 168	mm
r _a	max. 2	mm

Fonte: SKF, 2001.

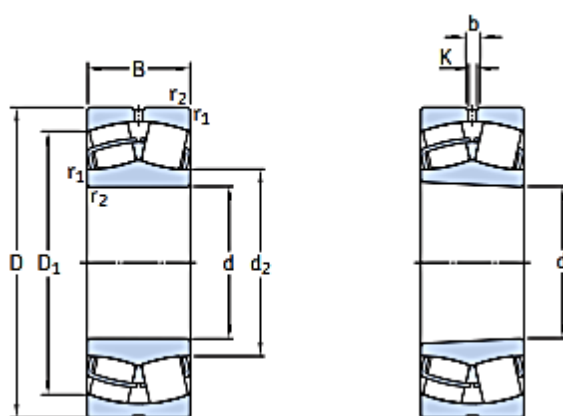
O rolo Cabeceira é um rolo que pesa 800 kg, com diâmetro externo máximo de 498 mm e mínimo de 490 mm. Possui 2950 mm de comprimento e um revestimento de Thermex-250. A máquina roda a uma velocidade de 450 m/min.

4.3 CÁLCULO DE VIDA ÚTIL

O cálculo para vida útil pode ser realizado de duas formas: vida nominal básica e vida nominal SKF. Para ambos os casos, é necessário saber o valor da carga que o rolamento é submetido. Para o cálculo dessa carga se faz necessário o conhecimento de alguns fatores. Um desses fatores seria o dimensionamento da tela formadora, já que o rolo cabeceira é quem faz a

sustentação da mesma e sofre carga decorrentes dessa sustentação. Para fazer esse dimensionamento exige-se maiores cálculos que vão além do estudo de caso desse trabalho de conclusão de curso, mas que podem tornar-se trabalhos futuros. Com isso em mente, optou-se por considerar uma vida útil para o rolamento com base na Figura 13 e, a partir disso, descobrir qual a carga máxima que o rolamento suportaria. Para realizar esse cálculo, será considerado que o rolamento sofre apenas uma carga radial, desconsiderando-se qualquer carga axial. A carga máxima será calculada usando os dados fornecidos pelo manual do fabricante para as dimensões contidas nas Figuras 27 e 28.

Figura 27 – Dados rolamentos autocompensadores de rolos
d de **100 a 130 mm**



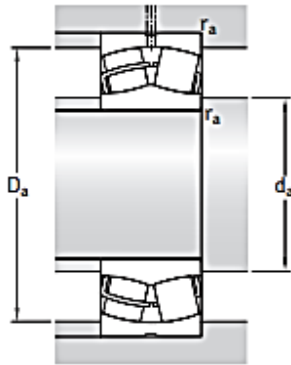
Furo cilíndrico

Furo cônico

Dimensões principais			Classificações básicas de carga		Limite de carga de fadiga P_u	Classificações de velocidade		Massa kg	Designações Rolamento com furo cilíndrico		furo cônico
d	D	B	C	C_0		Velocidade de referência	Velocidade limite				
mm			kN		kN	r/min			-		
100	150	50	285	415	45,5	2 800	4 000	3,15	* 24020 CC/W33	* 24020 CCK30/W33	
	165	52	365	490	53	3 000	4 000	4,55	* 23120 CC/W33	* 23120 CCK/W33	
	165	65	455	640	68	2 400	3 200	5,65	* 24120 CC/W33	* 24120 CCK30/W33	
	180	46	425	490	49	3 400	4 500	4,9	* 22220 E	* 22220 EK	
	180	60,3	475	600	63	2 400	3 400	6,85	* 23220 CC/W33	* 23220 CCK/W33	
	215	47	425	490	49	3 400	4 500	8,6	* 21320 E	* 21320 EK	
	215	73	815	950	88	2 400	3 000	13,5	* 22320 E	* 22320 EK	

Fonte: SKF, 2001.

Figura 28 – Dados rolamentos autocompensadores de rolos (continuação)



Dimensões						Dimensões de encosto e raio			Fatores de cálculo			
d	d ₂	D ₁	b	K	r _{1,2} min.	d _a min.	D _a máx.	r _a máx.	e	Y ₁	Y ₂	Y ₀
mm						mm			-			
100	111	132	6	3	1,5	107	143	1,5	0,28	2,4	3,6	2,5
	115	144	6	3	2	111	154	2	0,3	2,3	3,4	2,2
	113	141	4,4	2	2	111	154	2	0,37	1,8	2,7	1,8
	118	159	8,3	4,5	2,1	112	168	2	0,24	2,8	4,2	2,8
	117	153	8,3	4,5	2,1	112	168	2	0,33	2	3	2
	118	159	8,3	4,5	3	114	201	2,5	0,24	2,8	4,2	2,8
	130	184	11,1	6	3	114	201	2,5	0,33	2	3	2

Fonte: SKF, 2001.

Com essa tabela é possível obter os seguintes dados:

Tabela 7 – Dados de entrada para cálculo de vida útil

C	475 kN
P _u	63 kN
Velocidade de referência	2400 rpm
Velocidade limite	3400 rpm
e	0,33
Y ₁	2
Y ₂	3
Y ₀	2

Fonte: Autoria própria

Logo, da equação 2:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p = \left(\frac{475}{P}\right)^{10/3}$$

Da Figura 13, a opção que mais se aproxima da aplicação do rolamento no mancal do rolo cabeceira é a opção “Máquinas para uso contínuo durante 24 horas”. Essa opção fornece um intervalo de 40.000 a 50.000 horas operacionais. Portanto, para o cálculo será usado uma vida de 45.000 (média do intervalo). Da Equação 2 e 3 tem que:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 n} L_{10} \text{ e } L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

Substituindo a 2 na 3:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 n} \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

$$\frac{L_{10h} 60 n}{10^6} = \frac{C^p}{P^p}$$

$$P = \sqrt[p]{\frac{C^p 10^6}{60 n L_{10h}}}$$

Que é a máxima carga que o rolamento pode suportar. Conforme visto anteriormente, para rolamentos de rolos temos que p é $10/3$. Já a rotação pode ser calculada utilizando a velocidade dividida pelo diâmetro do rolamento multiplicado por π , ou seja, 796 rpm. Sendo assim:

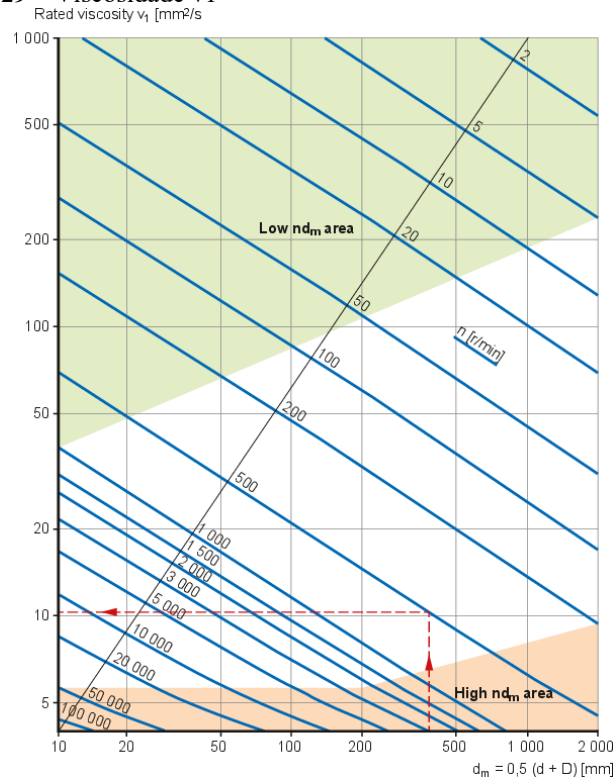
$$P = \sqrt[10/3]{\frac{(475)^{10/3} 10^6}{60 (796) 45000}} = 47,53 \text{ kN}$$

Isso quer dizer que, se considerar que o rolamento só possui carga radial e uma vida útil média de 45 mil horas operacionais (5 anos), o rolamento pode suportar até 47,53 kN de força agindo sobre ele.

Agora, para o cálculo da vida nominal SKF e com base na vida nominal básica, é necessário calcular a viscosidade, fator para nível de contaminação e nível de carga em relação à carga a fadiga. Para a viscosidade tem:

$$\kappa = \frac{v}{v_1}$$

Onde v é o dado do próprio lubrificante (MOBILGREASE XHP 222) que possui viscosidade de 222 mm²/s e v_1 é dado pela Figura 29, sendo aproximadamente 15 mm²/s.

Figura 29 – Viscosidade v_1 

Fonte: SKF, 2001.

Obtém então que:

$$\kappa = \frac{v}{v_1} = \frac{222}{15} = 14,8$$

Para o fator de nível de contaminação utiliza-se os dados da Figura 30.

Figura 30 – Valores de referência para o fator de contaminação

Condições	Fator $\eta_c^{1)}$ para rolamentos com diâmetro médio	
	$d_m < 100$ mm	$d_m \geq 100$ mm
Limpeza extrema • tamanho aproximado das partículas da mesma espessura do filme lubrificante • condições laboratoriais	1	1
Alto nível de limpeza • óleo filtrado através de filtro extremamente fino • condições típicas: os rolamentos vedados são lubrificados para toda a vida útil	0,8 ... 0,6	0,9 ... 0,8
Limpeza normal • óleo filtrado através de um filtro fino • condições típicas: os rolamentos com placas de proteção são lubrificados para a vida	0,6 ... 0,5	0,8 ... 0,6
Leve contaminação • condições típicas: rolamentos sem vedações integradas, filtragem grosseira, partículas de desgaste e leve infiltração de contaminantes	0,5 ... 0,3	0,6 ... 0,4
Contaminação típica • condições típicas de rolamentos sem vedações integradas, filtragem grosseira, partículas de desgaste e entrada de contaminantes	0,3 ... 0,1	0,4 ... 0,2
Contaminação grave • condições típicas: altos níveis de contaminação, devido a desgaste excessivo e/ou vedações ineficientes • arranjo de rolamentos com vedações ineficientes ou com danos	0,1 ... 0	0,1 ... 0
Contaminação muito grave • condições típicas: níveis de contaminação tão severas que os valores de η_c estão fora da escala, o que reduz significativamente a vida do rolamento	0	0

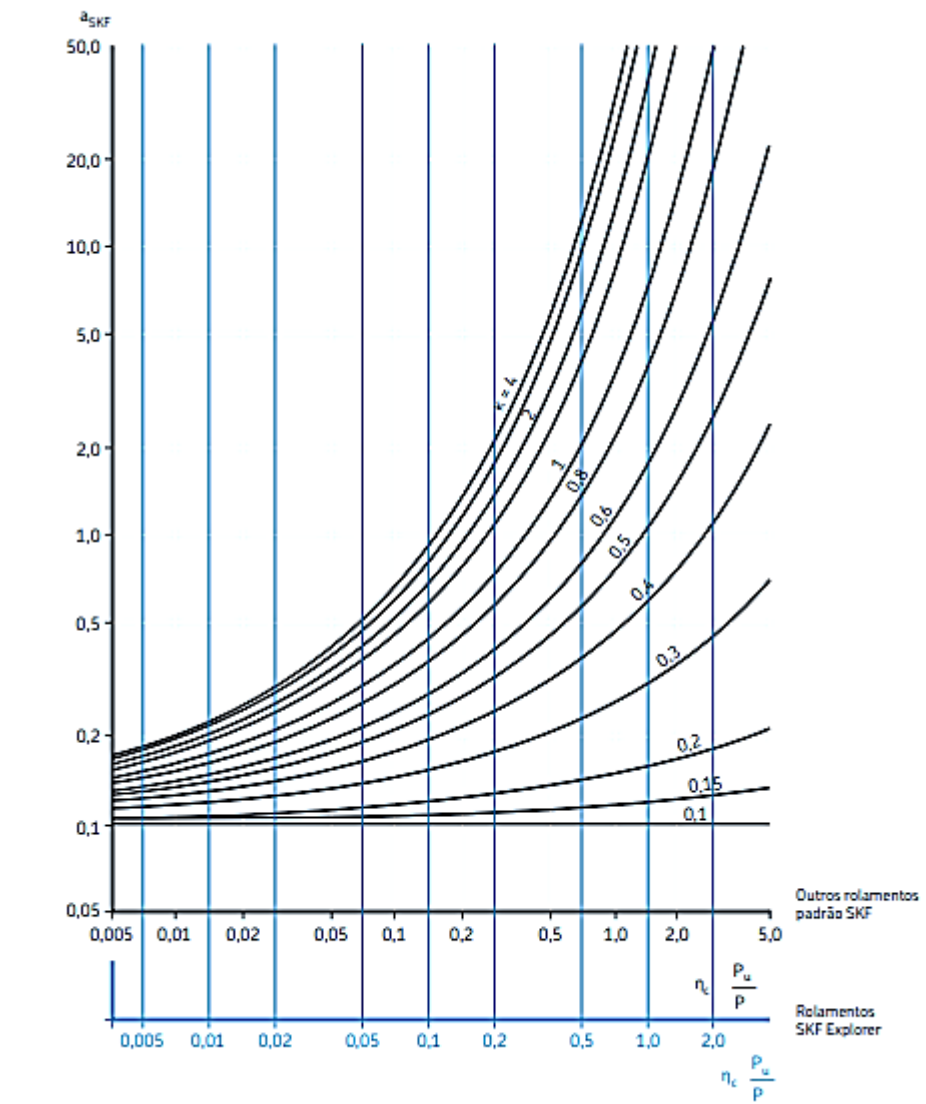
Fonte: SKF, 2001.

Considerando o nível de contaminação como leve contaminação, tem-se $\eta_u = 0,5$.

Para o nível de carga em relação a carga a fadiga utilizamos a Figura 31.

$$\eta_u \frac{P_u}{P} = \eta_u \frac{63}{47,53} = 0,5(1,325) = 0,663$$

Figura 31 – Fator a_{SKF} para rolamentos de rolos radiais
Fator a_{SKF} para rolamentos de rolos radiais



Fonte: SKF, 2001.

Confrontando os dados de outros rolamentos padrão (0,663) com $\kappa = 4$ (para $\kappa > 4$ sempre utilizar 4), obtemos $a_{SKF} = 6,5$. Com isso, da Equação 6:

$$L_{nm} = a_1 a_{SKF} \frac{L_{10h} 60 n}{10^6} = 1 \cdot 6,5 \cdot \frac{(45000) 60 (796)}{10^6} = 13969,8 \text{ milhões de revoluções}$$

Ou

$$L_{nmh} = \frac{10^6}{60 n} L_{nm} = \frac{10^6}{60 (796)} 13969,8 = 292500 \text{ horas de funcionamento}$$

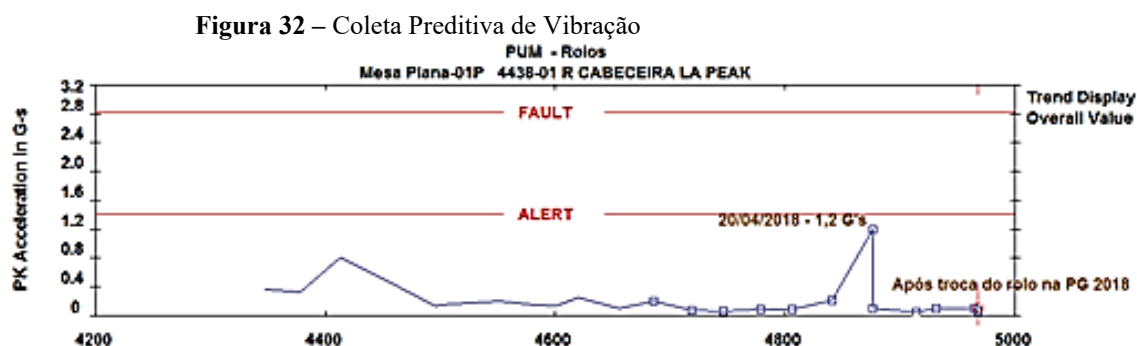
Isso significa em torno de 33 anos funcionando, de acordo com a vida nominal SKF. De qualquer forma, assumindo 45000 horas operacionais, seria pouco mais de 5 anos de vida útil. Percebe-se que o rolamento está trabalhando a uma velocidade relativamente pequena perto

da quantidade máxima que ele suporta (3400 rpm) e não apresenta muita contaminação de sólidos. Isso contribui para uma vida nominal SKF alta.

4.4 ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS

Após a falha, foi verificado o histórico de falhas do rolo dentro do sistema. Numa data anterior ocorreu uma falha similar, onde chamaram o plantão mecânico para verificar alta temperatura no mancal LA do rolo Cabeceira. Foi então aberto o mancal e verificado que a porca estava solta. Foi retirada a porca, trocada a trava aranha, e a máquina foi liberada. Ao voltar a rodar, a mesma voltou a aquecer e foi parada novamente. Foram feitos ajustes nas fitas de regulagem, mas mesmo assim voltou a aquecer. Foi decidido então trocar o rolo por um rolo reserva e enviar para revisão. Essa falha gerou 258 minutos de máquina parada, o que representou uma disponibilidade de 98,58%, e foi então realizada a análise de falha. Na análise de falha, definiu-se que a causa foi a tela formadora desgastada. Esse desgaste estava deixando o papel encanoado e para corrigir isso, foi feita a regulagem do rolo para corrigir o esticamento da tela (procedimento que não é padrão). Ao modificar essa regulagem do rolo, causou falha de sincronismo no movimento da haste do rolo, fazendo com que a caixa de rolamento enviesasse e travasse o movimento do rolo Cabeceira.

Foi também verificado o histórico de vibração do rolo. Antes da Parada Geral (maio/2018) onde foi trocado o rolo Cabeceira, a amplitude da vibração estava 1,2 G's. Após a troca do rolo foi coletado a leitura da vibração no dia 28/05/2018 e havia baixado para 0,4 G's. A coleta manteve-se assim até a última leitura antes da falha, realizada no dia 15/06/2018.



Fonte: Autoria própria

Por último, verificou-se a lubrificação do rolamento. A lubrificação é feita em intervalos de 45 dias, com lubrificante MOBILGREASE XHP 222. A lubrificação estava em

dia, visto que a última foi realizada no dia 19/06/2018. Conforme manual do fabricante do rolamento, a SKF “recomenda utilizar a experiência com base em dados de aplicações e testes reais”.

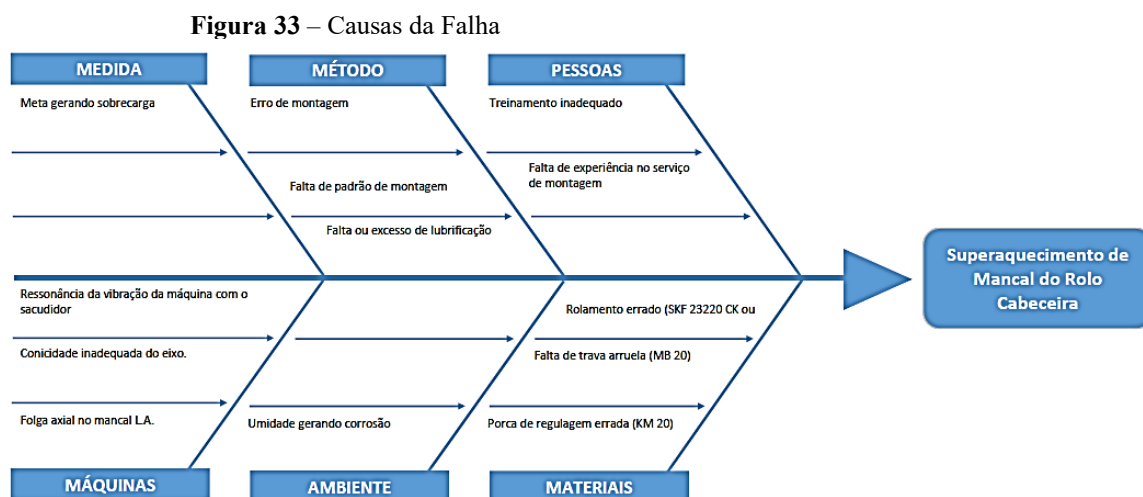
A falha custou para a empresa aproximadamente R\$ 22.000,00, tendo em vista os gastos apresentados na Tabela 8 e que cada minuto parado sem produção gera em média uma perda de R\$ 72,20 reais/min.

Tabela 8 – Custos da falha

	Item	Custo
Material	Rolamento 23220 CCK C3 / W33 MARCA SKF/FAG/NSK	R\$ 1.037,85
	Arruela Trava MB 20	R\$ 18,97
	Porca KM 20	R\$ 35,58
Pessoal	Serviço Colaboradores Internos	R\$ 1.012,34
	Serviço Mecânicos Terceiros	R\$ 594,99
Produção	Papel deixado de produzir (R\$ 72,20/min)	R\$ 19.205,20
TOTAL		R\$ 21.904,93

Fonte: Empresa.

Após deixar a máquina operando novamente, iniciou-se a análise da falha na qual foram realizadas reuniões para tentar chegar à causa raiz. Durante as reuniões foram levantadas possíveis causas para o aquecimento do mancal, sendo elas apresentadas na Figura 33.



Fonte: Autoria própria

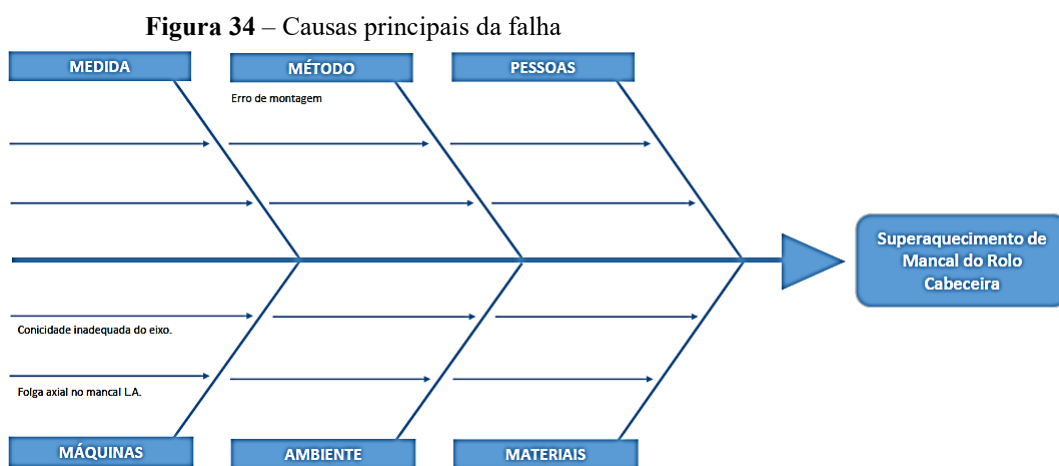
Dentre as principais causas levantadas, descartou-se a falta ou excesso de lubrificação, visto que a lubrificação estava dentro do prazo (a última lubrificação foi a menos de 30 dias antes da falha) e com a quantidade definida em manual.

No esquema de montagem apresentado na Figura 22 mostra-se que os componentes necessários para a montagem são os que estão no desenho, ou seja, o rolamento 23220, a trava aranha MB 20 e porca de fixação KM 20. Então também se descarta a suposta falta de componente para montagem e porca de regulagem errada.

Conforme relato da manutenção, ao abrir o mancal, a porca de fixação encontrava-se deslocada para a ponta do eixo, demonstrando que ela não estava travada, nem fixa no local onde deveria estar. O fato dela estar deslocada pode significar erro da montagem e ajuste, ou seja, falta de aperto e erro em ajustes, gerando também uma folga. A possível existência de uma folga axial no mancal também pode ter gerado a falha, visto que o rolamento recebe tensão tanto axial, quanto radial, devido ao constante movimento no conjunto sacudidor. Essa folga pode ter ocorrido simplesmente pelo desgaste natural do próprio rolamento, devido ao esforço repetitivo que acabou soltando a trava e a porca. Então as duas causas resultam em uma folga axial.

A ponta do eixo e o rolamento são cônicos, então quando se fala em conicidade inadequada do eixo, deve-se levar em consideração que, ao realizar a montagem do rolamento do mancal no eixo, esse problema já deveria ser detectado quando fizesse o ajuste do mesmo. Embora seja difícil de detectar essa conicidade inadequada, devido à folga radial ser pequena, existe a possibilidade de passar despercebido, por isso não se descarta a possível causa da falha.

A possível ressonância entre a vibração do sacudidor e a do próprio eixo pode existir e ser uma possível causa, mas descarta-se a possibilidade visto que foi um evento isolado e que não existem relatos em todos os anos de funcionamento da fábrica. Embora a máquina tenha uma área chamada “área úmida” onde contém maior umidade, esse mancal não está localizado nela. Na Figura 34 mostram-se as principais e possíveis causas da falha.



Fonte: Autoria própria.

Após verificar que as três causas são plausíveis, é necessário implementar a FMEA para analisar a falha a partir dessas causas. Para a FMEA será considerado que as causas de erro de montagem e folga axial são uma só, visto que o desgaste pelo impacto gera uma folga assim como a falta de aperto da porca e da trava, também geram uma folga axial. Para isso então, utilizou-se a FMEA para fazer a análise da falha. Essa FMEA pode ser visualizado no Apêndice A.

Na FMEA foi considerado dois modos de falha: folga axial e conicidade inadequada. No modo de falha de folga, considerou o rolamento juntamente com a trava e a porca, enquanto no da conicidade apenas o eixo. As causas, efeito e sintoma também estão descritos para cada modo de falha. Na coluna da técnica primária e frequência de monitoramento, evidencia-se quais técnicas existem para o monitoramento de modos de falha como os demonstrados, o que inclui inspeção nos equipamentos e coleta de dados a cada 30 dias e a troca do rolo por tempo de campanha, que é a cada 365 dias. Na coluna de índices atuais foi classificado o modo de falha de acordo com a Severidade, Ocorrência, Detecção e Risco. Esses índices estão detalhados nas tabelas 2, 3 e 4. Como o risco do modo de falha da folga deu acima de 200, considera-se uma falha inaceitável que tem que tomar medidas corretivas para a mitigação e reincidência. Já no modo de falha da conicidade, o risco entrou na zona de falha aceitável.

As ações corretivas para cada modo de falha estão descritas no FMEA. Nessas ações inclui a revisão do mancal na oficina, a retífica do labirinto, a troca dos componentes (trava, rolamento e porca) e inspeções rotineiras de temperatura. Atualmente os planos de manutenção preventivas englobam apenas a lubrificação dos mancais a cada 45 dias, coleta de dados de vibração e poucas inspeções durante as paradas programadas. Sugeriu-se então inspeções de temperatura do mancal diárias, já que a verificação da temperatura dura cerca de 5 minutos ou menos. Inclui-se também nas ações corretivas, a revisão (interna ou com empresa externa) e retífica do rolo (tanto o reserva quanto o que sai da máquina após a troca). Essas ações corretivas ajudam a prevenir e monitorar mais frequentemente para evitar a reincidência dessas falhas. Pode-se perceber que, com essas ações, o índice de risco diminuiu consideravelmente e entrou na zona de falha aceitável para os dois modos de falha.

Dessa forma, percebe-se que o modo de falha da folga axial é o que gera maior preocupação e atenção e é a causa mais provável dentre os dois modos de falha. Dessa forma, pode-se mostrar então que houve o superaquecimento do mancal, pois houve atrito entre a porca

de fixação do rolamento e a tampa do mancal, assim como do rolamento com o labirinto. Esse atrito se deve à vibração em excesso que foi ocasionada pela folga axial na caixa do mancal.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresenta-se a técnica de análise de falhas FMEA como a principal técnica para identificar as falhas em máquinas mecânicas. Com ela, é possível analisar a falha a fundo, evidenciando os modos de falhas, seus efeitos no processo e buscar suas causas raiz para evitar novas reincidências de falhas.

Além disso, a justificativa deste trabalho está relacionada com a importância do funcionamento correto dos equipamentos para as organizações, sendo um fator de grande importância para seu sucesso junto ao mercado, que é cada vez mais competitivo. Assim, a FMEA permite a criação de classificações que geram informações necessárias para a tomada de decisão dentro da empresa, em relação aos principais componentes mecânicos de um equipamento, que por sua vez ajudam a evitar perdas de produção e custos desnecessários adicionais na máquina como um todo e na linha de produção à qual pertence.

Pode-se observar, por meio da aplicação da FMEA que a causa raiz da falha foi a folga axial do mancal LA. O superaquecimento do mancal se deu pelo atrito entre as partes do mancal devido à vibração excessiva. Essa vibração excessiva foi gerada pela folga, provavelmente decorrente de algum erro na montagem e/ou desgaste por impacto nos elementos rolantes, da trava e da porca, do rolamento em estudo.

As ações de mitigação propostas na FMEA deste trabalho serão de grande ajuda para o monitoramento e eliminação de novas falhas decorrentes do mesmo modo de falha. Sugere-se também, durante o processo de análise de falha, a montagem do conjunto do mancal com uma contra-porca para ajudar a travar melhor o rolamento. Tal ação é inviável devido ao eixo terminar a poucos milímetros depois da porca de fixação e não possui espaço para uma porca extra. Embora seja uma sugestão coerente, nesse mancal em questão, não há a possibilidade de realizar dita ação.

Com as ações propostas no trabalho, é de se esperar que a vida do rolamento seja mais longa e próximo do esperado para mancais trabalhando 24 horas ininterruptas. A vida útil do mancal, conforme calculada, deve atender a pelo menos 5 anos de trabalho, considerando que o rolamento receba uma carga radial de aproximadamente 47,53 kN.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se dimensionar o tamanho e peso da tela formadora e das cargas aplicadas no rolamento para verificar se a carga axial existente não

ultrapassa os 47,53 kN, e assim estimar e chegar na vida útil do rolamento para as condições específicas em que ele trabalha.

Outras sugestões decorrentes deste trabalho são: verificar a geometria de encaixe do eixo que aloca o rolamento, especificamente comprovar se possui as dimensões e tolerâncias dimensionais (ajustes e afastamentos) conforme recomendações, tanto do fabricante da máquina como do fabricante de rolamentos.

Finalmente, em função do impacto desse componente para com a empresa, recomenda-se a elaboração de um documento que detalhe a forma correta de verificar as dimensões do eixo-rolamento, além do detalhamento da forma correta de montagem do mancal, incluindo ferramentas necessária e apropriadas para tal intervenção, seja preventiva ou corretiva.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 5462. (1994). **Confiabilidade e manutenibilidade**. Associação Brasileira De Normas Técnicas, (1), 37.
- ABRAMAN, Associação Brasileira de Manutenção. **Documento Nacional**. 2017. Disponível em: <http://api.ning.com/files/nTOI4J53cBrGAWH2KGJxZpc9MpUFtvuQVVwQbP4M-Zi5fay4zc3iGngUVTPcsz8kpJIsNq1HjIdm*n-EEExV6pwZzlfUYF2ql/DocumentoNacionalAbraman2017.pdf>. Acesso em: 16 out. 2018.
- BRANCO, Renata. (2010). **Modo de falha e análise de efeitos – FMEA ou FMECA**. Disponível em <[http://www.manufacturingterms.com/Portuguese/Failure-Mode-Effects-and-Criticality-Analysis-\(FMECA\).html](http://www.manufacturingterms.com/Portuguese/Failure-Mode-Effects-and-Criticality-Analysis-(FMECA).html)>. Acesso em: 23 out. 2017.
- CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012. xxi, 817 p
- DIAS, Acires. **Metodologia para análise de risco: mitigação de perda de SF6 em disjuntores**. Florianópolis: Ed Studio S, 2011. 303 p.
- FERNANDES, José Márcio Ramos; REBELATO, Marcelo Giroto. **Proposta de um método para integração entre QFD e FMEA**. Gest. Prod. [online]. 2006, vol.13, n.2, pp.245-259.
- FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 265 p.
- GENEROSO, Daniel João. Elementos de Máquinas. Araranguá, 2009. 74 p. Apostila.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Failure mode**. Disponível em <<http://www.electropedia.org/>>. Acesso em: 24 out. 2017.
- ISO 13379-1. (2012). **Condition monitoring and diagnostics of machines — Data interpretation and diagnostics techniques —Part 1: General guidelines**. (1). 33.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 4ª. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2012.
- LIRA, David N. **Modelagem do Prognóstico e Gestão da Saúde de Máquinas Mecânicas no contexto de Sistemas Ciberfísicos na Manufatura**. 2017. 171 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Materiais (PPGEM), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.
- MENNA, Alexandre Ribeiro. **Detecção de falhas em mancais de rolamento por análise de vibrações em banda larga: um caso prático de aplicação em uma população de equipamentos rotativos**. Porto Alegre, 2007. 186 p. Dissertação. Mestrado em Engenharia.

MICHAELIS. **Dicionário**, 2000. Disponível em: <<http://www.uol.com.br/michaelis/>>.

MOTORLUB, Lubrificantes industriais (2016). **5 problemas causados pela falta de manutenção em máquinas e equipamentos industriais**. Disponível em: <<http://www.motorlub.com.br/5-problemas-causados-pela-falta-de-manutencao-em-maquinas-e-equipamentos-industriais/>>. Acesso em: 11 nov. 2017.

FAG. Rolamentos FAG: Catálogo WL 41 520/3 PB. São Paulo: FAG, 1999. 714 p.

PERES, Carlos Roberto Coelho; LIMA, Gilson Brito Alves. **Proposta de modelo para controle de custos de manutenção com enfoque na aplicação de indicadores balanceados**. Gest. Prod. [online]. 2008, vol.15, n.1, pp.149-158.

POMPERMAYER, Cleonice Bastos. **Sistemas de Gestão de Custos: Dificuldades na Implantação**. Revista da FAE, Curitiba, v. 2, n. 3, set./dez. 1999. Disponível em: <<https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/524/418>>. Acesso em: 09 dez. 2017.

SAKURADA, Eduardo Yuji. **As técnicas de análise dos modos de falhas e seus efeitos e análise da árvore de falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos**. Florianópolis, 2001. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

SILVEIRA, Cristiano Bertulucci. **FMEA – Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos**. Citisystems, 2017. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/fmea-processo-analise-modos-falhas-efeitos/>>. Acesso em: 17 nov. 2017.

SIQUEIRA, Y. P. D. S. **Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implementação**. 1ª (Reimpressão). ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

SKF. **Catálogo Geral**: Catálogo 4000 PB. Leograf Gráfica e Editora Ltda, 2001. 976 p.

STONNER, Rodolpho. **FMEA e FMECA – análise do modo de falhas, efeitos e criticalidade**. BlogTek, 2016. Disponível em: <<http://blogtek.com.br/fmea-e-fmeca-analise-do-modo-de-falhas-efeitos-e-criticalidade/>>. Acesso em: 17 nov. 2017.

TELES, Jonathan. **Gestão de Custos de Manutenção**. Engeteles - Engenharia de Manutenção, Consultoria e Treinamentos, 2017. Disponível em: <<https://engeteles.com.br/gestao-de-custos-de-manutencao-parte1/>>. Acesso em: 09 dez. 2017.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM, Planejamento e Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro, RJ: Qualitymark, 2002. xv, 167 p.

