

UNIVERSIDADE DE ARARAQUARA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Elias Tadeu da Silva

**AVALIAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL DE
UMA USINA DE CANA DE AÇÚCAR POR MEIO DA
CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade de Araraquara – UNIARA – como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, Área de Concentração: Gestão Estratégica e Operacional da Produção.

Prof. Dr. Jorge Alberto Achar
Orientador

Prof. Dr. Cláudio Luis Piratelli
Co-orientador

Araraquara, SP – Brasil
2020

FICHA CATALOGRÁFICA

S579a Silva, Elias Tadeu

Avaliação da estratégia de manutenção industrial de uma usina de cana de açúcar por meio da confiabilidade dos equipamentos/Elias Tadeu Silva. – Araraquara: Universidade de Araraquara, 2020.
90f.

Dissertação (Mestrado) - Mestrado Profissional em Engenharia de Produção – Universidade de Araraquara - UNIARA

Orientador: Prof. Dr. Jorge Alberto Achcar
Coorientador: Prof. Dr. Claudio Luís Piratelli

1. Manutenção. 2. Confiabilidade. 3. MCC. 4. Cana. 5. Açúcar.
I. Título.

CDU 62-1

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, E.T. **Avaliação da estratégia de manutenção industrial de uma usina de cana de açúcar por meio da confiabilidade dos equipamentos.** 2020.90f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade de Araraquara, Araraquara-SP.

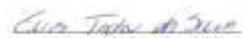
ATESTADO DE AUTORIA E CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Elias Tadeu da Silva

TÍTULO DO TRABALHO: Avaliação da estratégia de manutenção industrial de uma usina de cana de açúcar por meio da confiabilidade dos equipamentos.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2020

Conforme LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998, o autor declara ser integralmente responsável pelo conteúdo desta dissertação e concede a Universidade de Araraquara permissão para reproduzi-la, bem como emprestá-la ou ainda vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a sua autorização.



nome do(a) autor(a)

Elias Tadeu da Silva

Universidade de Araraquara – UNIARA

Rua Carlos Gomes, 1217, Centro. CEP: 14801–340, Araraquara-SP

Email (do autor): ENG.ELIASTADEU@BOL.COM.BR



UNIVERSIDADE DE ARARAQUARA - UNIARA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade de Araraquara – UNIARA – para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Gestão Estratégica e Operacional da Produção.

NOME DO AUTOR: ELIAS TADEU DA SILVA

TÍTULO DO TRABALHO:

"AVALIAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL DE UMA USINA DE CANA DE AÇÚCAR POR MEIO DA CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS."

Assinatura do(a) Examinador(a)

Conceito


Prof(a). Dr(a). Jorge Alberto Achcar (orientador(a))
Universidade de Araraquara - UNIARA

(X) Aprovado () Reprovado


Prof(a). Dr(a). José Luis García Hermosilla
Universidade de Araraquara - UNIARA

(X) Aprovado () Reprovado


Prof(a). Dr(a). Pedro Carlos Oprime
Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR

(X) Aprovado () Reprovado

Versão definitiva revisada pelo(a) orientador(a) em: 02/12/2020


Prof(a). Dr(a). Jorge Alberto Achcar (orientador(a))

Dedicatória
À Deus por permitir que e chegasse até esse momento. Minha esposa Alessandra pelo incentivo e aos meus filhos Pedro e João pela paciência e compreensão.

AGRADECIMENTOS

A empresa XXX pelo apoio financeiro e disponibilização dos dados operacionais, pois sem os mesmos esse desafio não seria possível.

Aos professores Dr. Jorge Alberto Achcar e Dr. Cláudio Luis Piratelli, orientador e co-orientador respectivamente, por toda orientação e auxílio durante toda essa jornada.

Aos colegas Leandro, Rodrigo Fredi, Rodrigo Vicentini e Rafael do Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da UNIARA pela amizade, companheirismo e resenhas.

À minha família pelo apoio incondicional.

Em especial a minha esposa Alessandra pelo incentivo e apoio, sem a qual este trabalho não poderia ter sido realizado.

Epígrafe
“Voce não pode mudar o vento, mas pode ajustar as velas do barco para chegar onde quer.”- Confúcio

RESUMO

A manutenção e a sua gestão possuem uma importância substancial na busca de vantagem competitiva para as companhias. Por isso, a análise de confiabilidade dos equipamentos é parte fundamental para a definição da estratégia de manutenção mais adequada. O objetivo deste estudo é avaliar por meio da MCC (Manutenção Centrada na Confiabilidade) a curva do ciclo de vida de uma usina de cana de açúcar localizada no interior do estado de São Paulo e desta forma responder se a atual estratégia é a mais adequada para o gerenciamento da sua manutenção. O método da pesquisa utilizado foi à modelagem estatística aplicada ao tempo entre falhas (TBF) e do Tempo de Reparo (TTR) de todos os equipamentos industriais que paralizam a operação da moenda, ou seja, interrupção na linha de produção. Estes tempos foram modelados por distribuições de probabilidade log-normal e Weibull e os resultados apontam que dentre as estratégias utilizadas pela usina o uso intensivo da manutenção preventiva durante a entressafra e a prática de utilizar sem um critério definido um mix de todos os tipos de manutenção durante a safra não é adequado. Como a análise estatística identificou, historicamente estes equipamentos se encontram na fase de mortalidade infantil do ciclo de vida útil, portanto sugere-se eliminar a causa raiz das falhas utilizando estratégias mais apropriadas e recomendadas pela literatura como as manutenções corretivas e emergenciais.

Palavras-chave: Manutenção. Confiabilidade. MCC. Cana. Açúcar.

ABSTRACT

Maintenance and its management are of substantial importance in the search for competitive advantage for companies. Therefore, the reliability analysis of the equipment is a fundamental part of the definition of the most appropriate maintenance strategy. The objective of this study is to evaluate, through RCM (Reliability Centered Maintenance), the industrial reliability curve of a sugar cane plant located in the countryside of the São Paulo State and, in this way, to answer if the current strategy is the most adequate for the maintenance management. The method of research used was the statistical modeling applied to the time between failures (TBF) and the Repair Time (TTR) of all industrial equipment that paralyze the mill operation, that is, interruption in the production line. These times were modeled by log-normal and Weibull probability distributions and the results indicate that among the strategies used by the plant the intensive use of preventive maintenance during the off-season and the practice of using a mix of all types of maintenance without a defined criterion during the harvest it is not suitable. As the statistical analysis identified, this equipment has historically been in the infant mortality phase of the life cycle, so it is suggested to eliminate the root cause of the failures using more appropriate and recommended strategies in the literature, such as corrective and emergency maintenance.

Key-words: *Maintenance. Reliability. RCM. Cane. Sugar.*

Lista de figuras

FIGURA 1- GRÁFICO DA CURVA DA BANHEIRA.....	16
FIGURA 1B - TIPOS DE CURVAS DE FALHAS.	30
FIGURA 2 - GRÁFICO DE PARETO DAS PARADAS INDUSTRIAIS NÃO PLANEJADAS.....	51
FIGURA 3- HISTOGRAMAS DOS TEMPOS ENTRE FALHAS (TBF)	51
FIGURA 4- HISTOGRAMAS DOS TEMPOS DE REPAROS (TTR).....	52
FIGURA 5- BOX-PLOT DOS TEMPOS DE REPAROS (TTR).	53
FIGURA 6- BOX-PLOTS DOS TEMPOS ENTRE FALHAS (TBF) NOS NÍVEIS DOS FATORES CONSIDERADOS NOS REGISTROS DE FALHAS.	54
FIGURA 7- GRÁFICOS DE PROBABILIDADE WEIBULL E LOG-NORMAL (DADOS TTR).....	57
FIGURA 8- GRÁFICOS DE PROBABILIDADE WEIBULL E LOG-NORMAL DIVIDIDOS POR ANOS (DADOS TTR)	58
FIGURA 9- GRÁFICOS DE PROBABILIDADE WEIBULL E LOG-NORMAL DIVIDIDOS POR MESES (DADOS TTR)	58
FIGURA 10- CURVAS ESTIMADAS DE CONFIABILIDADE DOS TEMPOS DE REPAROS (TTR) PARA OS FATORES ANOS E MÊS.....	59
FIGURA 11- GRÁFICOS DE PROBABILIDADE WEIBULL E LOG-NORMAL (DADOS TBF).....	60
FIGURA 12- GRÁFICOS DE PROBABILIDADE WEIBULL E LOG-NORMAL DIVIDIDOS POR ANOS (DADOS TBF)	61
FIGURA 13- GRÁFICOS DE PROBABILIDADE WEIBULL E LOG-NORMAL DIVIDIDOS POR MESES (DADOS TBF).....	61
FIGURA 14- CURVAS ESTIMADAS DE CONFIABILIDADE DOS TEMPOS ENTRE FALHAS (TBF) PARA OS FATORES ANO E MÊS.	62
.....	63
FIGURA 15- GRÁFICO DOS 5 INDICADORES COM MELHORA NA PERFORMANCE NO PERÍODO.	70
FIGURA 16- GRÁFICO DOS 2 INDICADORES COM PIORA NA PERFORMANCE NO PERÍODO.	71
FIGURA 17- CURVA DA BANHEIRA REPRESENTANDO A POSIÇÃO DA MANUTENÇÃO ENTRE 2012 A 2017.	72

FIGURA 18- GRÁFICO DOS COMPORTAMENTO SEMELHANTES DOS INDICADORES AO LONGO DO ANO	75
FIGURA 19- GRÁFICO DOS COMPORTAMENTO DOS INDICADORES AO LONGO DO ANO	75
FIGURA 20- COMPORTAMENTOS DAS FALHAS AO LONGO DO ANO.	76

Lista de Quadros

Quadro 1- Relação entre as fases do ciclo de vida e estratégias de manutenção de equipamentos	16
Quadro 2- Registro de Alteração e parada de Moenda.....	47
Quadro 3- Estratégia de manutenção do ciclo de vida de mortalidade infantil e o praticado pela empresa.....	81

Lista de Tabelas

Tabela 1- ANOVA para log(TTR) – Dados ANOS	55
Tabela 2- ANOVA para log(TTR) – Dados MESES	55
Tabela 3- ANOVA para log (TBF): Dados ANO.....	56
Tabela 4- ANOVA para log (TBF): Dados MÊS	56
Tabela 5- EMV para os parâmetros da distribuição de Weibull (TTR) em horas.....	56
Tabela 6- EMV para os parâmetros da distribuição de Log-normal (TTR) em horas.....	57
Tabela 7- EMV médias anuais dos tempos assumindo a distribuição log-normal (TTR) para os anos, resultados em horas.	58
Tabela 8- EMV para as médias mensais assumindo a distribuição log-normal (TTR) para os meses, resultados em horas.....	59
Tabela 9- EMV para os parâmetros da distribuição de Weibull (TBF).	60
Tabela 10- EMV para os parâmetros da distribuição de Log-normal (TBF).	60
Tabela 11- EMV para as médias anuais assumindo a distribuição Weibull (TBF) para os Anos, resultados em horas.	61
Tabela 12: EMV para as médias mensais assumindo a distribuição Weibull (TBF) para os meses, resultados em horas.....	62
Tabela 13- Resultados dos dados ANO	63
Tabela 14- Resultados dos dados mensais.....	65

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

AHP – *Analytical Hierarchy Process*,

ANOVA - Análise de Variância.

CCPP - Combined cycle power plants.

CIBOCOF - Center for Industrial Management Maintenance Concept Development Framework.

EFNMS - European Federation of National Maintenance Societies.

EMV - Estimadores de Verossimilhança.

FAA - Federal Aviation Administration.

FMEA - Failure Mode and Effects Analysis.

FTA - Fault tree analysis.

GTPP - Gas turbine power plants.

MCC - Manutenção centrada na confiabilidade.

MTBF – Tempo médio entre falhas

MTTF - Tempo médio para falha.

MTTF1 - Tempo médio para falha prematura.

MTTR – Tempo médio de reparo.

PSO - Optimização por exame de partículas.

RAMS - Reliability, Availability, Maintainability and Safety.

RCM - Reliability and Risk Centered Maintenance.

StDev - Standard Deviation.

STPP - Steam turbine power plants.

TBF - Time between failures.

TMC - Tempo médio de ciclo do sistema.

TMI - Tempo médio de inatividade do sistema.

TPM - Total Productive Maintenance.

TTR - Time to repair.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Problemas e questões da pesquisa	17
1.2 Objetivos da pesquisa	20
1.3 Objetivos específicos	20
1.4 Justificativa	20
1.5 Aspectos metodológicos	21
1.6 Estrutura do trabalho.....	22
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	23
2.1 Conceitos e políticas de manutenção industrial.....	23
2.2 Tipos de manutenção industrial	25
2.2.1 Manutenção Corretiva	25
2.2.1.1 Manutenção Corretiva Planejada.....	25
2.2.2 Manutenção Preventiva	26
2.2.3 Manutenção Preditiva	27
2.3 Manutenção Centrada na Confiabilidade, MCC.....	28
2.3.1 Histórico da Manutenção Centrada na Confiabilidade.....	28
2.3.2 Conceitos da Confiabilidade.....	28
2.3.3 Conceitos da MCC.....	29
3 CONCEITOS DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE.....	32
3.1 Função de Confiabilidade e distribuição acumulada de falhas.....	32
3.2 Função densidade de probabilidade de falhas	33
3.3 Função taxa de risco ou taxa de falha.....	34
3.4 Função taxa de falha acumulada.....	35
3.5 Tempo médio e Vida Residual	35
3.6 Modelos de Confiabilidade.....	36
3.7 Uso da distribuição de Weibull para os tempos de manutenção	36
3.8 Uso da distribuição log-normal para os tempos de manutenção	38
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA MCC	40
5 METODOLOGIA	44
5.1 Tipos de Pesquisa	45
5.2 Procedimentos operacionais	46
6 MODELAGEM ESTATÍSTICA DA CONFIABILIDADE.....	48
6.1 Caracterização da Empresa.....	48
6.2 Definição da Amostra.....	50

6.3	Boxplot dos Tempos de reparo (TTR).....	52
6.4	Boxplot do Tempo entre falhas (TBF).....	53
6.5	Uso de um modelo de análise de variância (ANOVA) para comparar as médias de TTR e TBF.....	54
6.5.1	ANOVA para Tempos de reparo (TTR).....	55
6.5.2	ANOVA para Tempos entre falhas (TBF)	55
6.6	Construção do modelo de análise de confiabilidade.....	56
6.6.1	Estimadores de Verossimilhança (EMV) para os tempos de reparos.....	56
6.6.2	Estimadores de Verossimilhança (EMV) para os tempos entre falhas.....	59
6.7	Resultados da análise estatística	62
7	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	69
7.1	Comportamento dos indicadores ao longo dos anos	69
7.2	Discussão dos resultados (Ano).....	72
7.3	Comportamento dos Indicadores ao longo dos meses.....	74
7.4	Discussão dos resultados (Mês).....	76
8	CONCLUSÃO	80
8.1	Trabalhos futuros.....	82
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias tem promovido mudanças fundamentais na estrutura e nos processos de trabalho (MOREIRA NETO; TAVARES, 2015). A concorrência entre as organizações demanda um planejamento de manutenção adequado para proporcionar maior confiabilidade e tempo de atividade para os equipamentos, o que reduz de forma significativa as perdas durante a produção (RUSCHEL; SANTOS; LOURES, 2017).

O segmento sucroenergético conhecido anteriormente como indústria do açúcar e do álcool possui um portfólio de produtos com elevado valor agregado (bioeletricidade, bioplásticos, biorrefinárias e alcoolquímica) e com o aumento de seus derivados o panorama operacional do setor foi alterado, ou seja, passou-se de um processo semi-artesanal para um processo com alto nível de automação (FERNANDES, 2009).

A adoção mais intensa de sistemas automatizados e modernos equipamentos têm levado o setor de manutenção a uma posição estratégica, em face da importância da disponibilidade operacional para o resultado global das empresas (MOREIRA NETO; TAVARES, 2015). Para Alsyouf (2009) as atividades de manutenção estão se tornando mais complexas, pois um sistema de fabricação convencional não consiste apenas dos tradicionais equipamentos mecânicos, mas incorporam em seu sistema elementos eletrônicos, hidráulicos, eletromecânicos, software e humanos. Desta forma qualquer alteração que perturbe o funcionamento do sistema pode ocorrer devido a diferentes fatores (HOLMBERG, 2001).

Instalações industriais mantidas de forma inadequada ou com sua manutenção negligenciada, em algum momento irão precisar de reparos dispendiosos, devido ao desgaste ocorrido ao longo do tempo (VISHNU; REGIKUMA, 2016). Ainda de acordo com Vishnu e Regikuma (2016) o principal objetivo da manutenção de uma planta industrial é alcançar a quebra mínima e manter os equipamentos em condições de operação ao menor custo possível.

A Federação Europeia das Sociedades Nacionais de Manutenção (EFNMS) define a manutenção como a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e gerenciais utilizadas durante o ciclo de vida de um equipamento que são destinadas a retê-lo ou restaurá-lo ao estado no qual ele possa executar sua função requerida.

Para Mobley (2002) a manutenção pode ser classificada em manutenção corretiva, manutenção preventiva, manutenção preditiva, manutenção produtiva total (TPM) e manutenção centrada na confiabilidade (MCC).

Para Carvalho (2012) as políticas de manutenção se dividem em Manutenção Corretiva e Manutenção Preventiva e determinar qual utilizar é a principal tarefa do planejamento da manutenção. Carvalho (2012) também argumenta que a maioria dos modelos atuais procuram minimizar os custos de manutenção ou diminuir o tempo de parada do equipamento e assim aumentar a disponibilidade e diminuir os custos de operação. Sellitto (2005) cita as técnicas tradicionais, porém explora os conceitos de Confiabilidade da Manutenção e assim como outros autores propõem políticas de manutenção específicas considerando custos e o risco para cada equipamento estudado.

Uma política de manutenção eficiente é a combinação entre as manutenções corretivas, preventivas e preditivas, porém o tipo de manutenção e o intervalo entre as mesmas é uma função do comportamento de sua taxa de falha e do custo global envolvido no dano ocorrido (FARRERO; TARRÉS; LOSILLA, 2002).

Para Fogliatto e Ribeiro (2008) a MCC (Manutenção Centrada na Confiabilidade) é definida como um programa que associa técnicas de engenharia de manutenção com um tratamento sistemático e seu objetivo é garantir a função original dos equipamentos fabris.

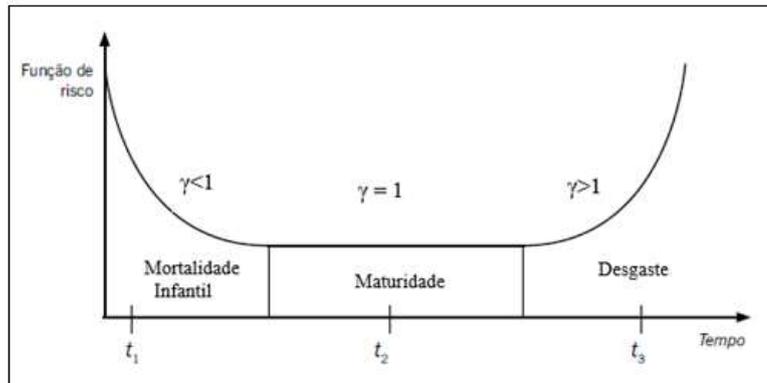
Para Moreira Neto e Tavares (2015) a MCC é a aplicação de uma metodologia estruturada para definir a estratégia de manutenção mais adequada para um equipamento ou sistema, por meio de um plano concebido mediante a análise das suas reais necessidades e o contexto que faz parte. Assim como forma de garantir a competitividade e permanência no mercado, as empresas consideradas de classe mundial utilizam as práticas da MCC para definir os planos de manutenção dos equipamentos, pois essa metodologia analisa de forma detalhada as funções e padrões de desempenho como a forma que ocorre a falha, o que causa cada falha, as consequências da falha e a forma de prevenção (SOUZA; LIMA, 2003).

A curva da banheira é uma construção abstrata e representa de forma genérica a função de risco $h(t)$ a qual expressa a expectativa de falha de um item ao longo do ciclo de vida dos equipamentos (CERVEIRA; SELLITTO, 2015; LAFRAIA, 2011).

De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2009) a função de risco, taxa de risco ou taxa de falha $h(t)$ é considerada a medida de confiabilidade mais difundida e seu comportamento ao longo do ciclo de vida do produto pode ser representada pela curva da banheira (ver, Figura 1). Durante a vida útil, um item apresenta valores de taxas de falha variáveis e a curva da banheira expressa a expectativa de falha desse equipamento ao longo do tempo (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009). Na curva da banheira para o modelo de Weibull quando $\gamma < 1$ a taxa de falha é decrescente

(fase de mortalidade infantil), $\gamma = 1$ a taxa de falha é constante (fase de maturidade) e para $\gamma > 1$ a taxa de falha é crescente (mortalidade senil ou desgaste) (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009).

Figura 1- Gráfico da Curva da Banheira.



Fonte: Próprio Autor (2020)

Para cada fase do ciclo de vida de um equipamento existe uma estratégia de manutenção adequada e Sellitto (2005) relaciona o valor do parâmetro de forma de Weibull γ com esses períodos. O Quadro 1 mostra essa relação entre fase e estratégia.

Quadro 1- Relação entre as fases do ciclo de vida e estratégias de manutenção de equipamentos

Fase	Estratégia	Decorrência
Mortalidade infantil (Falhas decrescente) $\gamma < 1$	Emergência	Retarda ou até impede o fim da mortalidade infantil ao não reforçar os itens que quebraram ou não remover as causas das falhas de origem.
	Corretiva	Antecipa o fim da mortalidade infantil ao reforçar os itens que quebraram ou remover as causas das falhas de origem.
	Preditiva	Monitora as falhas em progresso que podem resultar em quebra, mas estas são muito poucas nesta fase, pois as quebras se dão mais por baixa resistência.
	Preventiva	Perpetua ou até agrava a mortalidade infantil ao trocar exatamente os sobreviventes, os itens fortes, que não têm falhas de origem.
Maturidade (Falhas aleatórias) $\gamma = 1$	Emergência	Como se limita a trocar componentes quebrados, pode fazer retornar à mortalidade infantil se não selecionar os substitutos.
	Corretiva	É inócua quanto às falhas catastróficas, mas pode reduzir o patamar de expectativa de falhas eliminando modos de falha que passaram da primeira fase.
	Preditiva	Informa o início e monitora os processos de falhas progressivas que resultarão em quebras, podendo prever aumentos na probabilidade da quebra.
	Preventiva	Retorna à mortalidade infantil ao trocar exatamente os sobreviventes, os itens fortes, que não têm falhas de origem e ainda não iniciaram o desgaste.
Desgaste (Falhas progressivas)	Emergência	Permite que as quebras que vão ocorrer realmente ocorram a um custo interno mais baixo do que a preventiva.
	Corretiva	Só será útil se for capaz de retardar ou o início da falha ou a quebra que realmente vai ocorrer.

$\gamma > 1$	Preditiva	Monitora os processos progressivos de falhas já iniciados predizendo aumentos na probabilidade da quebra.
	Preventiva	Previne a emergência antecipando a troca à quebra que realmente vai ocorrer, porém a um custo interno mais alto do que a emergência

Fonte: Adaptado Sellitto (2005)

De acordo com Souza et al. (2018) as indústrias nacionais produtoras de açúcar e álcool tem como principal prioridade em seus planejamentos a manutenção corretiva planejada devido a características de sazonalidade de sua operação, pois existe grande disponibilidade de tempo no período conhecido como entressafra (aproximadamente seis meses).

Na indústria alimentícia a linha de produção é composta por máquinas interligadas e mecanismos de transferências comuns com diferentes modos de falha, na ocorrência de uma falha aleatória em algum equipamento a maior parte da linha interrompe o processo e o produto inacabado pode ser descartado por causa da deterioração ou problemas de qualidade (TSAROUHAS, 2012). De forma semelhante, em uma usina de cana de açúcar os gestores devem considerar a gerenciamento da manutenção como uma parte estratégica da companhia, pois quando uma manutenção é feita de forma inadequada, provavelmente as consequências são paradas não programadas para manutenção corretiva o que ocasiona queda de produtividade e aumento de custos relativos às manutenções constantes (FERNANDES, 2009).

Para Souza et al. (2018) na busca de competitividade no setor sucroalcooleiro a gestão da manutenção é estratégica, pois as usinas são responsáveis pela fabricação de todo açúcar e álcool produzido no país o que contribui de forma positiva para o saldo da balança comercial do Brasil com a venda do excedente de sua produção para o mercado externo. O açúcar e o etanol são considerados commodities pelo mercado internacional e para a sobrevivência e crescimento dessas empresas deve-se investir em fatores geradores de competitividade, ou seja, na gestão da manutenção (SOUZA et al., 2018).

1.1 Problemas e questões da pesquisa

Sellitto (2005) após uma pesquisa qualitativa feita com diversos gestores concluiu que as estratégias de manutenção via de regra são elaboradas por métodos subjetivos, ou seja, em equipamentos críticos é indicado a manutenção preventiva, para equipamentos ociosos admite-se manutenções emergenciais e para equipamentos redundantes a manutenção corretiva. Para Alsyouf (2007) uma política de manutenção eficaz torna uma empresa mais competitiva no mercado, por meio do melhor aproveitamento do tempo de funcionamento dos equipamentos.

A MCC é uma estratégia de manutenção conhecida por preservar a eficiência operacional de plantas industriais em diversos setores, inclusive setores críticos como usinas de

energia, militar, aviação, ferroviário, petrolífero e naval (CARRETERO et al., 2000). Entretanto em um estudo elaborado por Vishnu e Regikumar (2016) na indústria de processamento de cana de açúcar na Índia, foi identificado que a MCC de forma geral ainda não havia sido implementada devido à falta de metodologias e ferramentas adequadas.

Os profissionais de manutenção habituados com ações rápidas e de curto prazo são desestimulados a utilizar a MCC, por se tratar de um modelo rígido, de longa duração para amadurecimento de suas técnicas e práticas (SELLITTO; BORCHARDT; ARAÚJO, 2002). Muitos desses profissionais acreditam na premissa de que as falhas ocorrem por desgaste ao longo do tempo, porém estudos realizados na aviação identificaram que apenas 11% dos componentes falham devido ao desgaste e fadiga (LAFRAIA, 2001; WILMETH; USREY, 2000).

Após a definição do projeto cabe ao setor de manutenção manter ou recuperar o desempenho original do equipamento, porém a partir de um certo ponto na vida desse item essa capacidade é limitada, desta forma ou se reduz as expectativas de desempenho ou é necessário introduzir modificações de projeto que podem ser baseadas no conhecimento adquirido ao longo do tempo pela manutenção (SELLITTO, 2007)

A MCC é composta de duas abordagens, a primeira é a abordagem qualitativa fundamentada principalmente na Análise do Modo de Falhas, Efeitos e Criticidade (FMECA – *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) e na Análise de Árvore de Falhas (FTA – *Fault Tree Analysis*); a segunda é a abordagem quantitativa, baseada na modelagem de tempos entre falhas e tempos de reparo (MENDES; RIBEIRO, 2014). Na literatura sobre MCC a abordagem qualitativa é mais predominante, porém Mendes (2011) sugere que as técnicas quantitativas são as que podem contribuir mais efetivamente para o aumento da confiabilidade dos sistemas de produção.

Para Gandhare, Akarte e Patil (2018), uma indústria de processo exige grandes quantias de investimento e disponibilidade contínua de suas instalações, sendo a manutenção uma área crítica da companhia, pois é responsável pelo desempenho dos equipamentos. A indústria açucareira opera de forma sazonal e a disponibilidade de sua instalação durante o período de fabricação do açúcar determina o seu desempenho (GANDHARE; AKARTE; PATIL, 2018).

A política de manutenção de uma usina de processamento de cana de açúcar, historicamente é dividida em dois períodos de safra e entressafra. De forma geral na entressafra a unidade industrial está parada para a manutenção preventiva e na safra a unidade industrial está operante e disponível para a produção.

Srikrishna, Yadava e Rao (1996) no estudo da confiabilidade aplicada a equipamentos auxiliares em usinas de energia, justificaram porque a abordagem quantitativa da MCC havia ficado em segundo plano em relação à abordagem qualitativa, porque havia falta de dados históricos dos equipamentos e métodos estatísticos adequados para interpretar as informações.

Na empresa objeto de estudo o período de safra é compreendido entre o início do mês de abril e final do mês de novembro, funcionando de forma integral e constante, com paradas mensais periódicas de 6 horas destinadas a manutenções programadas e manutenções emergenciais quando necessário. Ainda neste período tem-se o planejamento da manutenção para a entressafra, pois os dados e demandas coletados por meio dos históricos e experiência dos operadores mais antigos, nesta fase, são as bases de informações para as manutenções futuras.

Na entressafra, entre o início do mês de dezembro e final do mês de março, a operação da indústria está totalmente paralisada, por causa do termino da colheita de cana de açúcar. Por isso a indústria está disponível para a manutenção de acordo com o planejamento e o orçamento previamente estabelecido durante a safra.

No setor metal-mecânico, Sellitto (2005) revisou os conceitos ligados as variáveis de processos aleatórios como forma de definição das bases da confiabilidade e modelagem aplicada à gestão da manutenção. Por meio da modelagem estatística do tempo entre falhas e do tempo de reparo, foi estabelecido a estratégia de manutenção desse setor (SELLITO, 2005).

Mengue e Sellitto (2013) definiram a estratégia de manutenção (preventiva, preditiva, corretiva ou emergencial) mais adequada para uma bomba centrífuga de uma planta petrolífera com base nos conceitos da confiabilidade. Os tempos obtidos no estudo foram modelados por distribuições de probabilidade e mediante os resultados foram determinados as funções de Confiabilidade $R(t)$, Manutenibilidade $M(t)$ e a Disponibilidade de uma bomba centrífuga (MENGUE; SELLITO, 2013).

Komninakis (2017) avaliou a coerência da estratégia de manutenção de uma indústria alimentícia por meio da modelagem estatística aplicada ao tempo de reparo (TTR) e ao tempo entre falhas (TBF) de uma linha de produção constituída por seis máquinas de embalagens, no qual os dados foram modelados por distribuições de probabilidade Log-normal e Weibull.

Identificar o trecho que o equipamento esta situado no ciclo de vida da curva da banheira é fundamental para a formulação estratégica e gestão da manutenção industrial (SELLITTO, 2007).

Mediante ao que foi exposto acima pelos diversos autores a questão dessa pesquisa é avaliar através dos trabalhos de Sellitto (2005, 2007), Mengue e Sellitto (2013) e Komninakis (2017) se a atual estratégia de manutenção da empresa objeto de estudo é a mais adequada para seus equipamentos industriais com base na determinação do trecho do ciclo de vida da sua linha de produção.

1.2 Objetivos da pesquisa

O objetivo geral deste trabalho é por meio da MCC identificar a fase a qual essa linha de produção esta situada na curva da banheira e assim avaliar se a manutenção industrial dessa usina de cana de açúcar é a mais adequada de acordo com as recomendações de cada período e assim responder a questão formulada acima (a atual estratégia de manutenção da empresa objeto de estudo e a mais adequada para o gerenciamento da sua manutenção?).

1.3 Objetivos específicos

Esse trabalho possui como objetivos específicos a estimação na forma mensal e anual dos tempos entre falhas (TBF), tempos de reparos (TTR), disponibilidade, confiabilidade, taxa de falhas e determinação do posicionamento da linha de produção industrial na curva de ciclo de vida (curva da banheira). De acordo com os resultados obtidos sugerir a melhor estratégia de manutenção a ser tomada.

1.4 Justificativa

Ainda que exista uma grande quantidade de estudos que discorra sobre confiabilidade de equipamentos pela ótica dos fabricantes o mesmo não se repete com relação à perspectiva da manutenção (SANTOS; COLOSIMO; MOTTA, 2007) e o uso das técnicas de confiabilidade são desestimuladas devido ao rigor dos modelos e a necessidade de ações rápidas e certas (SELLITTO; BORCHARDT; ARAÚJO, 2002). Desta forma o modo mais tradicional como a manutenção é programada, ainda é a informalidade, porque utiliza como referência apenas informações básicas como a experiência dos funcionários, catálogos e manuais, sem a profundidade necessária para compreender as causas raízes dos problemas (LAFRAIA, 2001).

Para Deshpande e Modak (2002) a maioria das equipes de manutenção ainda atuam de forma reativa e as manutenções preventivas aplicadas são insuficientes, pois são utilizadas de forma conservadora e as informações sobre a necessidade deste tipo de manutenção não são rastreáveis e muitas das tecnologias disponíveis para executar a manutenção preditiva ainda não foram introduzidas nas indústrias.

A escolha da estratégia de manutenção de uma empresa deve ser direcionada pelo uso de métodos quantitativos, onde nos últimos anos várias abordagens deste tipo foram estudadas e aplicadas à manutenção em companhias de diversos segmentos como a metodologia MCC a qual identifica e investiga os riscos e os impactos dos modos de falha e propõe o melhor tipo de manutenção a ser executado para minimizar o dano (SELLITTO, 2007). Para Moreira Neto e Tavares (2015) MCC é uma metodologia que visa aperfeiçoar a estratégia do planejamento da manutenção, ou seja, ela seleciona o tipo de manutenção mais propício para uma determinada situação e se utilizada de forma correta amplia a disponibilidade física dos equipamentos

Para Rausand (1998) a MCC permite a redução dos custos de manutenção mediante a priorização das principais funções de um sistema, pois as atividades de manutenção fundamentais são agregadas e as desnecessárias são evitadas ou removidas do planejamento.

Essa metodologia é a evolução da tradicional forma de manutenção, pois ela tem como objetivo central reduzir os custos de manutenção por meio da seleção das principais funções de um sistema e evitar ou remover tarefas de manutenção que não são estritamente necessárias (WIREMAN, 1998).

Planos de manutenção devem conter análises quantitativas para se compreender o tipo e o período mais adequado ao comportamento da taxa de falha de cada equipamento e assim selecionar atividades de manutenções que contribuam de forma efetiva para o aumento da disponibilidade dos equipamentos e a redução de custo das empresas (MENDES; RIBEIRO, 2014).

Este trabalho também se justifica devido à importância do etanol no Brasil e no mundo, pois nosso país é o segundo maior produtor perdendo apenas para os Estados Unidos, e movimenta uma cadeia de suprimentos, distribuidores e diversos profissionais que sobrevivem da manufatura dos vários produtos e subprodutos da cana de açúcar como as indústrias farmacêuticas, químicas e alimentícias (FERNANDES, 2009).

1.5 Aspectos metodológicos

Para Berto e Nakano (2014) uma pesquisa descritiva tem como objetivo descrever fenômenos ou situações por meio de observações e detalhes e assim determinar um perfil. Desta forma o tipo de pesquisa deste trabalho será a descritiva, pois tem como objetivo elaborar um modelo estatístico que descreve as falhas que ocorrem nos equipamentos e elaborar um perfil com suas características. Esta análise é realizada por meio das informações contidas e armazenadas em um banco de dados da própria empresa.

A abordagem quantitativa deve ser utilizada em investigações de descrição e investigações de fenômenos explícitos com objetivos lastreados pelo número de ocorrências e a modelagem utiliza habilidades matemáticas para desenvolver um modelo que descreve e representa o funcionamento de um sistema ou parte dele (BERTO; NAKANO, 2014). De acordo com Miguel (2007) a modelagem emprega o uso de técnicas matemáticas e estatísticas para descrever o funcionamento de um sistema ao elaborar modelos que auxiliam no entendimento do ambiente, identificação de problemas e na definição de estratégias para a tomada de decisão. A pesquisa qualitativa é baseada na interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados, não requerendo a utilização de métodos e técnicas estatísticas (SILVA; MENEZES, 2005). Abordagens quantitativas podem valer-se de dados quantitativos, assim como qualitativas podem fazer uso de dados quantitativos para auxiliar a interpretação do pesquisador aumentando as opções de sua análise e interpretação (BERTO; NAKANO, 2014).

Neste trabalho a abordagem será a quantitativa e qualitativa. A quantitativa é devido ao uso das técnicas estatísticas e qualitativa oferece o suporte para a interpretação dos resultados pela ótica dos conceitos da MCC. O método utilizado é a modelagem estatística dos dados com a estimação da confiabilidade dos equipamentos por meio dos dados relacionados aos tempos entre falhas (TBF) e dos tempos de reparo (TTR) dos equipamentos de uma indústria. A análise estatística é realizada usando o software Minitab[®] versão 2016. Na modelagem dos dados são assumidos a distribuição de Weibull e a distribuição log-normal. Além disso, também é considerado uma análise descritiva preliminar dos dados assumindo medidas descritivas usuais como médias e variâncias amostrais e gráficos de Box-plots como ferramentas estatísticas adicionais.

1.6 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está estruturada em outras oito seções. Na seção 2 é apresentado o referencial teórico dos principais conceitos de manutenções e detalhamento da Manutenção Centrada na Confiabilidade com seus conceitos e foco em modelos estatísticos para análise dos dados de sobrevivência. Na seção 3 são apresentados os conceitos da análise da confiabilidade e suas principais funções. A seção 4 apresenta a revisão bibliográfica com as práticas e tendências mundiais da manutenção. A seção 5 apresenta a metodologia usada. Na seção 6 é apresentado a modelagem estatística, os dados, as características da empresa, análises

descritivas e os modelos de ANOVA. A seção 7 apresenta uma discussão dos resultados obtidos. Finalmente a seção 8 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceitos e políticas de manutenção industrial

A manutenção abrange as atividades relacionadas à correção, prevenção ou predição de falhas (SANTOS; COLOSIMO; MOTTA, 2007). Para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994) a manutenção consiste na combinação de todas as ações técnicas e administrativas, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida. O dicionário Houaiss define Manutenção como “ato de fazer perdurar algo em determinado estado”. Na engenharia o objetivo principal da manutenção é manter por longos períodos, os ativos fixos de uma empresa em condições de atender de forma plena as suas finalidades funcionais (MIRSHAWKA; OLMEDO, 1993).

A manutenção é responsável por manter e recuperar a funcionalidade dos equipamentos industriais, mesmo com o avanço tecnológico que trouxe inúmeras inovações eles ainda falham em algum momento durante suas vidas (SANTOS; COLOSIMO; MOTTA, 2007). Plano de manutenção é o conjunto de todas as tarefas que almejam detectar, prevenir e corrigir os modos de falha em uma periodicidade de execução definida e deve ser elaborado em função dos efeitos das falhas e conter ações que sejam aplicáveis e economicamente viáveis (TATSCH, 2010).

De acordo com a NBR 5462-1994 defeito é a alteração ou desvio de uma característica relacionada aos seus requisitos que podem ou não ser determinado. O defeito pode ou não afetar a capacidade de um item desempenhar a sua função requerida.

Falha é o termino das condições de um item desempenhar a sua função requerida, ou seja, o equipamento fica indisponível por atuação automática de proteção ou por desligamento por motivo de emergência (SANTOS; COLOSIMO; MOTTA, 2007). Para Tatsch (2010), falha funcional é a incapacidade de um item executar uma atribuição específica dentro de limites pré-estabelecidos, também é conhecida como estado de falha (TATSCH, 2010). Já falha potencial é uma condição detectável e mensurável que indica uma falha funcional pendente ou em

processo de ocorrência e pode apresentar uma forma de defeito (TATSCH, 2010). Pane é um estado do item em falha sendo o resultado da falha (NBR 5462-1994).

Reparo é a parte da manutenção corretiva que restaura o item ao estado em que se encontrava imediatamente antes da falha (NBR 5462-1994, SANTOS; COLOSIMO; MOTTA, 2007).

Viana (2002) define a Mantenabilidade como a capacidade de um item conservar ou ser recolocado em condição de executar suas funções requeridas, de acordo com as exigências de uso especificadas, quando a manutenção é realizada conforme condições determinadas como procedimentos e meios prescritos.

Confiabilidade é a capacidade de um item de desempenhar uma função requerida sob condições específicas, durante um intervalo de tempo (NBR5462-1994). Para Fogliato e Ribeiro (2009) confiabilidade é uma metodologia científica aplicada na identificação do desempenho ou comportamento dos equipamentos durante um período de tempo e em condições operacionais pré-estabelecidas sem falhar.

De acordo com Viana (2002), na literatura há várias classificações para manutenção, porém observa-se que há um consenso para a seguinte classificação:

a) Manutenção Corretiva: manutenção efetuada após a falha, ela é executada com o objetivo de recolocar o equipamento em condições de executar a função requerida;

b) Manutenção Preventiva: manutenção executada antes de a falha ocorrer, tem o objetivo a reduzir ou evitar a falha ou queda de desempenho da produção;

c) Manutenção Preditiva: são tarefas de a manutenção preventiva destinada a monitorar o equipamento ou peça por meio de medições ou controle estatístico com o objetivo de prever a próxima ocorrência de falha.

d) Manutenção Autônoma: o planejamento e programação dos serviços que serão realizados pelos operadores, ou seja, é uma atividade mantenedora presente e efetiva no meio produtivo. As tarefas executadas pelos operadores vão desde a limpeza, lubrificação, manutenções simples e até serviços complexos como análise e melhoria dos instrumentos de produção.

Os vários tipos de definições referentes à manutenção como os citados acima, se encontram em um mesmo ponto, ou seja, para a forma de como as intervenções são realizadas nos equipamentos industriais (FERNANDES, 2009). Para Kardec e Nascif (2009) os principais

tipos de manutenção são Corretiva Não Planejada, Corretiva Planejada, Preventiva, Preditiva, Detectiva e Engenharia de Manutenção.

Os diferentes termos referentes a manutenção adotados atualmente não são novos tipos de manutenção, mas sim ferramentas que permitem a aplicação dos seis políticas principais.

2.2 Tipos de manutenção industrial

2.2.1 Manutenção Corretiva

A NBR5462-1994 define manutenção corretiva como a executada após a ocorrência de uma pane com o objetivo de recolocar um item em condições de desempenhar uma função requerida. Para não ampliar as consequências com relação aos instrumentos de produção, saúde do trabalhador e meio ambiente, essa manutenção é realizada imediatamente, o que configura uma intervenção aleatória, ou seja, sem planejamento (VIANA, 2002).

Esse tipo de manutenção é uma atividade reativa utilizada para manter a condição de integridade, operação e a viabilidade de um sistema após a ocorrência da falha, porém a utilização indiscriminada dessa manutenção pode acarretar aspectos negativos como falhas aleatórias em momentos inoportunos e ocasionar perigo aos demais componentes do sistema e custos de manutenção adicionais (FITCH, 1992).

Para Kardec e Nascif (2009), manutenção corretiva atua para correção de uma falha ou de um desempenho inferior ao esperado, ou seja, a intervenção ocorre quando existe um defeito ou um desempenho diferente ao previsto e esse tipo de manutenção não é necessariamente uma manutenção de emergência, desta forma ela pode ser dividida e classificada em Manutenção Corretiva Planejada e Manutenção Corretiva não Planejada.

2.2.1.1 Manutenção Corretiva Planejada

De forma geral, manutenção corretiva planejada é uma decisão gerencial, com base na alteração dos parâmetros de condição observados pela manutenção preditiva. É a correção do desempenho menor do que o esperado ou a correção da falha (KARDEC; NASCIF, 2009).

Para a adoção deste tipo de manutenção é necessário considerar o planejamento adequado dos serviços de manutenção, conciliar a necessidade de manutenção com os interesses da produção, aspectos de risco para a segurança pessoal ou para a instalação, garantias de peças sobressalentes, equipamentos e ferramental necessários para as intervenções (VAZ, 2003).

2.2.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é classificada como a manutenção realizada em todo serviço de manutenção executado em equipamentos que não estejam em falha, ou seja, estão em condições operacionais ou em estado de zero defeito (VIANA, 2002).

Para Xenos (1998), são ações executadas com o objetivo de manter um item físico em condições operantes por meio de inspeções, detecção, prevenção de falhas e substituição de peças.

Para Kardec e Nascif (2009), a Manutenção Preventiva é realizada de forma a reduzir ou evitar a falha ou queda no desempenho do equipamento, porém deve-se seguir um plano previamente elaborado e baseado em intervalos definidos de tempo. Ela consiste na substituição de peças em períodos regulares com o objetivo preventivo de realizar a intervenção antes que ocorra uma falha inesperada, porém isso pode acarretar uma subutilização das peças antes do fim de sua vida útil (FERNANDES, 2009). Alguns fatores como riscos de agressão ao meio ambiente e oportunidades em equipamentos críticos são fatores mandatórios para a realização das intervenções para substituição de componentes (KARDEC; NASCIF, 2009).

A Manutenção Preventiva pode ser baseada no tempo quando as atividades necessárias para preservar as capacidades funcionais dos equipamentos são planejadas em pontos específicos no tempo. Quando as atividades são programas devido a anormalidades detectadas nos equipamentos, por meio da análise de parâmetros de condição ou desempenho, também é conhecida como manutenção preditiva (SANTOS; COLOSIMO; MOTTA, 2007).

A vantagem da manutenção preventiva é proporcionar um conhecimento prévio das ações, gerenciar e nivelar as atividades e recursos além da previsibilidade dos materiais sobressalentes em estoque, porém os aspectos negativos estão relacionados à introdução de defeitos não existentes no equipamento devido à falha humana, falha de sobressalentes, contaminações no sistema de lubrificação, danos durante a partida e paradas e falha dos procedimentos de manutenção (KARDEC; NASCIF, 2009).

Dentro do conceito de Manutenção preventiva a “manutenção de oportunidade” é uma intervenção adicional utilizada quando se aproveita a oportunidade de executar uma manutenção quando alguma intervenção já esteja sendo executada

2.2.3 Manutenção Preditiva

Esse tipo de manutenção também é conhecido como manutenção sob condição ou manutenção com base no estado do equipamento e remete a ações de prevenção da falha com o objetivo de intervir no equipamento para a manutenção somente quando necessário (HIPKIN; DE COCK, 2000).

É uma manutenção baseada na condição do equipamento, ou seja, é a atuação realizada com base na alteração dos parâmetros de condição ou desempenho e obedece a uma sistemática de acompanhamento (KARDEC; NASCIF, 2009). Para Moreira Neto e Tavares (20015) esse tipo de manutenção tem o objetivo de acompanhar os equipamentos por meio de instrumentos de medição apropriados e identificar alterações em seus parâmetros que possam causar falhas.

As técnicas preditivas mais utilizadas na indústria para acompanhar os parâmetros dos equipamentos são o Ensaio por Ultrassom, Análise de Vibrações Mecânicas, Análise de Óleos Lubrificantes e Termografia, essas técnicas tem a finalidade de determinar o momento correto da próxima intervenção para a manutenção e desta forma evitar desmontagens para inspeção e dispor do componente até o máximo de sua vida útil. (VIANA, 2002). Assim, de acordo com Kardec e Nascif (2009) essa técnica de manutenção permite predizer as condições do equipamento, e a correção será realizada por meio de uma corretiva programada o que permite a preparação prévia do serviço e outras decisões relacionadas à produção.

Para Kardec e Nascif (2009), existem quatro condições básicas para a adoção dessa técnica:

- Equipamento ou sistema deve permitir algum tipo de monitoramento/medição;
- Devido aos custos envolvidos na análise o sistema ou equipamento a ser monitorado deve possuir uma importância significativa para a companhia;
- As causas das falhas devem ser passíveis de monitoramento;
- Deve ser definido um programa sistematizado de análise e diagnóstico de acompanhamento;

O que diferencia esse modo de realizar a manutenção é a forma como as intervenções são subordinadas aos resultados das inspeções como a vibração, espessura e das análises de óleo (BALDIN, 1982 apud VAZ, 2003).

A Manutenção Preditiva ganhou força a partir da década de 60 e sem dúvida é o tipo de manutenção que mais evoluiu devido ao desenvolvimento da área da eletrônica e motivado por

seu constante aprimoramento é uma prática cada vez mais adotada na indústria (KARDEC; NASCIF, 2009).

2.3 Manutenção Centrada na Confiabilidade, MCC

2.3.1 Histórico da Manutenção Centrada na Confiabilidade

O conceito de confiabilidade foi desenvolvido pela Agência Federal de Aviação (FAA) dos Estados Unidos em 1960, após a formação de um comitê composto por representantes da FAA e aviação civil para analisar a capacidade da manutenção preventiva da época, a formação desse grupo originou o Programa de Confiabilidade FAA/Indústria (MOUBRAY, 1997). Após um estudo detalhado o comitê concluiu que se um item não possuir um modo predominante e característico de falha, manutenções programadas afetam muito pouco seu nível de confiabilidade e para muitos itens, a prática de manutenção preventiva não é eficaz; essas conclusões reorientaram os procedimentos de manutenção utilizados na época, contrariando o modelo tradicional do período (MOUBRAY, 1997).

O próximo passo foi organizar o que foi aprendido com os programas anteriores e desenvolver uma abordagem lógica aplicável e em 1970, a empresa norte americana Boeing comprovou que a manutenção convencional até então utilizada tornaria o novo Jato 747 inviável economicamente e seria impossível que ele operasse com lucratividade (MOUBRAY, 1997; SMITH, 1993).

2.3.2 Conceitos da Confiabilidade

Para uma empresa permanecer ao longo do tempo no mercado, ela não pode depender exclusivamente da “propaganda como alma do negócio”, pois o mercado consumidor impõe suas necessidades de Qualidade, mais que isso, suas necessidades de Qualidade ao longo do tempo, isto é, a Confiabilidade (VACCARO, 1997). A principal diferença entre Confiabilidade e Qualidade é que a primeira incorpora a passagem do tempo, e isso não ocorre com a Qualidade, que consiste em uma descrição estática de um item (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Para Garvin (1988) é possível identificar cinco abordagens principais para definir a qualidade: a transcendente, baseada em produto, baseada em usuário, baseada em manufatura e por ultimo a baseada no valor. Também relacionado a esse conceito Garvin (1988) descreve

oito dimensões para a qualidade: performance, características, confiabilidade, conformidade, durabilidade, serviço, estética e qualidade percebida.

Para Halpern (1978) o termo Qualidade está relacionado a capacidade que um produto ou processo possui em estar em conformidade com especificações e normas já o termo Confiabilidade com a probabilidade de que um determinado item consiga cumprir algum objetivo específico sob condições ambientais específicas em um período de tempo determinado. O conceito de Confiabilidade envolve de forma direta considerações sobre o tempo, ela parte do princípio que todos os produtos não duram para sempre e que em algum momento ele poderá apresentar sinais de fadiga e posterior possibilidade de falhas maiores (VACCARO, 1997).

Segundo Fogliato e Ribeiro (2009) os conceitos de qualidade e confiabilidade dos itens se inter-relacionam no projeto, na manufatura e na utilização. A qualidade pode ser subdividida em sua capacidade de atender as necessidades e desejo dos usuários finais (estéticos e desempenhos), na redução da variabilidade dos processos de manufatura que é responsável pelas falhas precoces nos itens, na variabilidade no ambiente de operação a qual é responsável pelas ocorrências aleatórias nos itens e por fim na deterioração do produto como fonte de falhas por desgaste.

2.3.3 Conceitos da MCC

É um método de planejamento que pode modificar ou alterar as técnicas de manutenções tradicionais com o objetivo de sistematizar a definição de tarefas para garantir a confiabilidade e a segurança operacional ao menor custo (SCHUINA et al., 2014). MCC é uma abordagem que visa aperfeiçoar os recursos disponíveis e é utilizada para melhorar e aperfeiçoar as técnicas tradicionais de manutenção com o objetivo de assegurar somente as funções necessárias para a operação confiável do equipamento e assim proporcionar economia (WILMETH; USREY, 2000). O objetivo da MCC é criar uma estratégia de manutenção de rotina rentável economicamente e que preserve as principais funções do sistema ou equipamento (SCHWAN, 1999 apud WILMETH; UREY, 2000).

2.3.4 Definição de falha funcional e Curvas de Falha

A falha é definida como a cessão de uma função requerida de um item ou a incapacidade de satisfazer a um padrão de desempenho previsto e função requerida pode ser entendida como o limite de admissibilidade abaixo do qual a função não é mais satisfatória (KARDEC; NASCIF, 2009). Segundo Komninakis (2017) a RCM defini como falha funcional a

incapacidade de um item ou equipamento desempenhar uma função específica dentro dos limites esperados de performance.

Kardec e Nascif (2009) relacionam a falha com a confiabilidade, quanto maior o número de falhas menor será a confiabilidade de um item, quanto maior a confiabilidade, melhores serão os resultados para o cliente ou usuário e por fim quanto maior a confiabilidade, menores serão os custos de produção. Porém os custos de manutenção aumentam de forma substancial a medida que o índice de confiabilidade tende a 100% (KARDEC; NASCIF, 2009).

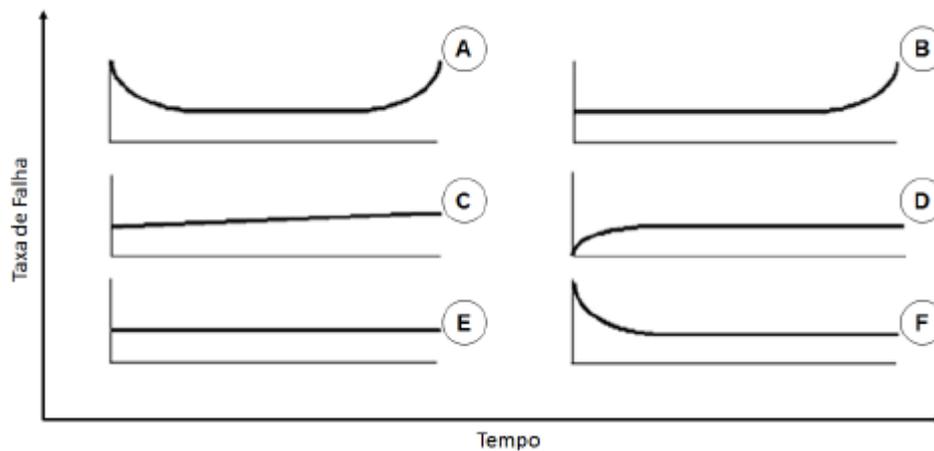
A origem da curva de falha ou curva da banheira não esta clara, ela aparece nas tabelas de vida da análise atuarial desde 1963 e é utilizada quase sempre nos textos de confiabilidade para descrever o comportamento de falha dos equipamentos, componentes e sistemas (KLUTKE; KIESSLER; WORTMAN, 2003). A curva de falhas pode assumir a forma ou comportamento com taxa crescente, constante ou decrescente (SELLITTO, 2005).

Equipamentos operando sob a mesmas condições podem apresentar comportamentos de falhas diferentes (curvas de falhas), pois seus comportamentos estão sujeitos a fatores diferentes (KOMNINAKIS, 2017), por isso quando admite-se que todos os equipamentos apresentam a mesma curva de falhas durante seu ciclo de vida útil, o uso da RCM tem pouco resultado na confiabilidade dos equipamentos.

Para Lafraia (2001) nem todos os equipamentos ou sistemas apresentam todas as fases da curva da banheira, desta forma alguns podem apresentar apenas a fase de mortalidade infantil como exemplo. Assim, podemos afirmar que os equipamentos ou sistemas podem apresentar ao longo de seu ciclo de vida algumas fases da curva da banheira e não necessariamente todas (KOMNINAKIS, 2017).

Atualmente existem seis modelos de de curvas de falhas adotadas pela RCM conforme a figura abaixo, e elas são utilizadas para caracterizar a vida útil dos equipamentos e não apenas a curva da banheira (KARDEC; NASCIF, 2009).

Figura 1b - Tipos de curvas de falhas.



Fonte: Adaptado de Moubray (1997)

De acordo com Moubray (1997) temos que:

- Tipo A – curva da banheira. caracterizada por um período de mortalidade infantil, período de vida útil com falhas aleatórias (maturidade) e desgaste acentuado (mortalidade senil).

Exemplos: motores elétricos, engrenagens e ventiladores;

- Tipo B – nesse caso ocorrem poucas falhas prematuras durante a vida útil, com desgaste acentuado após determinado período.

Exemplos: válvulas e pistões;

- Tipo C – mecanismo que apresenta índice de falhas crescente e constante; elas não ocorrem por desgaste, e sim por fadiga.

Exemplos: compressores de ar, turbinas, engrenagens e rolamentos;

- Tipo D – no início da vida útil a taxa de falhas é baixa, porém, em seguida, a taxa de falhas é constante.

Exemplo: itens exaustivamente testados antes de serem instalados;

- Tipo E – falhas descritas por esse mecanismo são bastante aleatórias e podem ocorrer sem aviso em qualquer período, dessa forma, é impossível prever o tempo de vida do componente.

Exemplo: lâmpadas;

- Tipo F – apresenta alto índice de mortalidade infantil e, com o tempo, diminuem a uma taxa constante.

Exemplo: componentes eletrônicos e softwares.

3. CONCEITOS DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

3.1 Função de Confiabilidade e distribuição acumulada de falhas

A Confiabilidade apresenta um conceito que está relacionado às leis de degradação física de um item (DIAS, 2010). De acordo com Giolo e Colosimo (2006), a função confiabilidade é uma das mais importantes funções probabilísticas utilizadas para descrever estudos de sobrevivência.

Confiabilidade é a probabilidade a qual um item poderá desempenhar de forma plena a sua função requerida durante um intervalo de tempo especificado e parâmetros pré-determinadas (XENOS, 1998). De acordo com a NBR 5452 (1994), a confiabilidade é a capacidade que um item possui para desempenhar uma função requerida sob condições específicas, durante um dado intervalo de tempo, sendo que o termo “confiabilidade” é utilizado como um padrão de desempenho de confiabilidade.

Um sistema confiável é aquele que requer menos intervenções, gera menos custos e apresenta processos mais desenvolvidos e equilibrados (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Para Sellitto (2005) a Confiabilidade $R(t)$ é uma função que varia entre 0 e 1 e pode ser utilizada como um indicador parcial da eficiência de um projeto industrial. Essa função expressa o sucesso de uma operação, pois indica a ausência falhas durante um intervalo de tempo predefinido (FLOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Um dos objetivos principais da análise do tempo de vida T de um equipamento é a determinação da probabilidade de o mesmo falhar em um determinado tempo $[t, t+\Delta t]$ (CARVALHO, 2012).

No estudo da confiabilidade, a variável aleatória T também pode ser representada por outras grandezas e expressar uma função de quilômetros percorridos por um automóvel, o número de ciclos *ON/OFF* de um interruptor e o número de ciclos de um motor elétrico entre outras (CARVALHO, 2012).

A função de confiabilidade é definida como a probabilidade de um equipamento não falhar antes de um tempo t , isto é, em termos probabilísticos ela é dada por,

$$R(t) = P(T > t) \quad (3.1)$$

Para Vaccaro (1997) a definição da equação acima descreve a Confiabilidade como a probabilidade de um equipamento ou sistema não falhar durante o intervalo de tempo $[0; t]$ e isso é equivalente a calcular a probabilidade de o mesmo esteja em pleno funcionamento até o instante t .

Em consequência da equação (3.1), a função distribuição acumulada de falhas definida com a probabilidade de uma observação ser menor do que um tempo t é dada por:

$$F(t) = 1 - R(t), \quad t \geq 0 \quad (3.2)$$

3.2. Função densidade de probabilidade de falhas

A função densidade de probabilidade de ocorrência de falha pode ser definida por meio da modelagem da variação temporal da probabilidade de falha funcional do item por unidade de tempo (TATSCH, 2010). Ou seja, ela pode ser utilizada para descrever a frequência relativa dos tempos de falha como uma função do tempo (CARVALHO, 2012). Da mesma forma para Kececioglu (2002a) ela possibilita determinar a probabilidade de falha ao longo de um período.

Ao assumir o pressuposto o qual a função confiabilidade é derivável e continua em relação aos tempos de falha, como consequência pela expressão (3.2), do mesmo modo a função distribuição acumulada de falhas será derivável, desta forma, sob esse pressuposto pode-se derivar a função distribuição acumulada $F(t)$ de falhas para a obtenção da função densidade de probabilidade de falha $f(t)$ (VACCARO, 1997; KOMNINAKIS, 2017). Assim, é possível por meio da derivada da Função de Distribuição Acumulada de Falhas obter a Função Densidade de Probabilidade de Falhas (Função Distribuição de Probabilidades de Falha).

A função densidade de probabilidade de falhas denotada por $f(t)$, é dada por:

$$f(t) = \frac{dF}{dt}(t), \quad t \geq 0 \quad (3.3)$$

Da mesma forma, tem-se a partir de (3.2) que:

$$\frac{dR}{dt}(t) = -\frac{dF}{dt}(t) = -f(t), \quad t \geq 0 \quad (3.4)$$

E por meio destas equações (e sob as mesmas hipóteses), pode-se concluir que:

$$F(t) = \int_0^t f(s).ds , t \geq 0 \quad (3.5)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(s).ds , t \geq 0 \quad (3.6)$$

3.3 Função taxa de risco ou taxa de falha

A função de risco $h(t)$ é a medida de confiabilidade mais difundida na prática, e ela pode ser entendida como a quantidade de risco associada a uma unidade no tempo t (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Essa função é de grande importância para engenheiros de projeto, engenheiros de sistemas e para grupos de reparo e manutenção (ELSAIED, 1996).

É adequada para a análise do risco ao qual um item ou equipamento está exposto ao longo do tempo e também é reconhecido como base comparativa entre unidades com características distintas (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Essa função, que indica a cada instante qual a taxa de que o componente venha a falhar, ou seja, mostra a influência percentual da Probabilidade de Falha em relação à Confiabilidade em cada instante (VACCARO, 1997).

A função taxa de risco ou taxa de falha apresentada por $h(t)$, é a probabilidade da falha ocorrer em um intervalo de tempo $[t_1, t_2]$, dado que não ocorreu até t_1 , ou seja, as proporções de falhas que ocorrem por unidade de tempo (GIOLO; COLOSIMO, 2006; KECECIOGLU, 2002a). A probabilidade de falhas no intervalo $[t_1, t_2]$, pode ser expressa em termos da função confiabilidade como:

$$R(t_1) - R(t_2) \quad (3.7)$$

Assim, a taxa de falha no intervalo $[t_1, t_2]$, é dada por:

$$\frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_2 - t_1)R(t_1)} \quad (3.8)$$

De forma geral, pode-se representar o intervalo $[t_1, t_2]$, por $(t, t + \Delta t)$, isto é, $t_2 = t + \Delta t$ e a expressão (3.8) assume a forma:

$$h(t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t R(t)} \quad (3.9)$$

Considerando um Δt bem pequeno, $h(t)$ representa a taxa de falha instantânea, ou taxa de risco, no tempo t condicional à sobrevivência até o tempo t , ou seja, descreve a forma em que a taxa instantânea de falha muda com o tempo (GIOLO; COLOSIMO, 2006).

Assim, pode-se achar da expressão (3.9), quando $\Delta t \rightarrow 0$, uma fórmula muito útil para a função de risco $h(t)$ dada por:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.10)$$

$$\text{onde: } \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t} = f(t)$$

3.4 Função taxa de falha acumulada

A Função Taxa de Falha Acumulada pode ser retratada como uma alternativa para a função de risco (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). De acordo com Giolo e Colosimo (2006) a função taxa de falha acumulada é muito utilizada na análise de sobrevivência e, como seu próprio nome sugere, é a taxa de falha que acumula as falhas do indivíduo, tendo sua definição como:

$$H(t) = \int_0^t h(t) dt \quad (3.11)$$

3.5 Tempo médio e Vida Residual

Tempo médio denotado por MTTF (*mean time to failure*) mede o tempo que um paciente, item, componente ou sistema que sobrevive até a morte ou falha, ou seja, é o tempo médio de vida.

O MTTF é obtido pela área sob a função de confiabilidade, ou seja:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.12)$$

3.6 Modelos de Confiabilidade

Na análise de sobrevivência ou análise de confiabilidade, há dois tipos de modelos de análise:

- Modelos não-paramétricos, onde não é necessária a especificação de nenhuma distribuição de probabilidade para os dados de tempo de vida de um componente ou sistema (RAUSAND, 1994);
- Modelos paramétricos ou probabilísticos, onde é necessária a especificação de uma distribuição de probabilidade adequada aos dados (GIOLO; COLOSIMO, 2006).

O uso de métodos não-paramétricos nos permite ganhar perspectiva quanto a natureza da distribuição de dados a partir do qual foi desenhada sem, no entanto, selecionar uma distribuição específica (LEWIS, 1994).

Para Giolo e Colosimo (2006), o uso de técnicas paramétricas tem sido mais frequente na área industrial que na área médica, razão pela qual, na indústria os estudos envolvendo componentes e equipamentos podem ser planejados e, fontes de perturbação, podem ser controladas. Apesar de algumas distribuições de probabilidade serem, certamente, mais conhecidas, como a Normal e a Binomial, quando se trata de descrever a variável “tempo entre falhas”, outras distribuições mostram-se mais adequadas. E, embora haja uma variedade de modelos probabilísticos utilizados na análise de sobrevivência, alguns ganham posição de destaque, por apresentarem comprovada adequação em distintas situações, como os modelos Exponencial, Weibull e o log-normal (GIOLO; COLOSIMO, 2006).

A seguir são apresentadas algumas das principais distribuições de probabilidade usadas na análise de confiabilidade.

3.7 Uso da distribuição de Weibull para os tempos de manutenção

A distribuição de Weibull, amplamente conhecida em virtude de sua simplicidade e flexibilidade em acomodar diferentes formas de função de risco, é talvez o modelo de distribuição mais utilizado em análise de tempos de vida (WEIBULL, 1951; GIOLO; COLOSIMO, 2006). Para uma variável aleatória T com distribuição Weibull, a função de densidade de probabilidade é dada por:

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta^\gamma} t^{\gamma-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma\right\}, \quad t \geq 0, \quad (3.13)$$

em que t é o tempo até a falha, γ é o parâmetro de forma e θ é o parâmetro de escala, todos positivos. Denota-se a distribuição Weibull (3.13) por $T \sim Wei(\gamma, \theta)$.

Para a distribuição de Weibull, a função de sobrevivência $R(t)$ é dada por,

$$R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma\right\} \quad (3.14)$$

A taxa de falha é dada por:

$$h(t) = \frac{\gamma}{\theta^\gamma} t^{\gamma-1}, \quad (3.15)$$

para $t \geq 0$, γ e $\theta > 0$.

A forma da curva de sobrevivência é determinada exclusivamente pelo parâmetro γ . Se a população considerada tem taxa de falha que aumenta com o tempo, o valor de γ será maior que 1. Para taxa de falha constante, o valor de γ será igual a 1. Caso a taxa de falha for decrescente com o tempo, o valor de γ será menor que 1.

Neste caso, pode-se ter riscos (taxas de falha) crescentes para $\gamma > 1$; decrescentes para $\gamma < 1$ e constante para $\gamma = 1$.

As expressões para o tempo médio de vida $E(T)$ e a variância $Var(T)$ do modelo de Weibull são dados por,

$$E(T) = \theta \Gamma\left[1 + \left(\frac{1}{\gamma}\right)\right], \quad (3.16)$$

$$Var(T) = \theta^2 \left[\Gamma\left[1 + \left(\frac{2}{\gamma}\right)\right] - \Gamma\left[1 + \left(\frac{1}{\gamma}\right)\right]^2 \right], \quad (3.17)$$

sendo a função gama, $\Gamma(k)$, definida por:

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} x^{k-1} \exp\{-x\} dx \quad (3.18)$$

O percentil 100p%, ou vida residual, é dado por:

$$P(T \leq t_p) = t_p = \theta[-\ln(1-p)]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (3.19)$$

onde p é o percentil em que ocorrem as falhas, t_p é o provável tempo em que $p\%$ das falhas ocorrerão.

Sellitto (2005) relaciona as fases do ciclo de vida da curva da banheira com os valores do parâmetro de forma γ de Weibull, que representa o comportamento da curva de falhas do equipamento, elencando os tipos de falhas mais comuns encontradas em cada fase, a saber:

- Na fase de mortalidade infantil, onde $\gamma < 1$, a taxa de falhas é alta, porém decrescente ao longo do tempo. As falhas são prematuras, normalmente originadas por deficiências no processo de fabricação, instalação incorreta, ou materiais fora de especificação.
- Já na fase de maturidade, onde $\gamma = 1$, a taxa de falhas é sensivelmente menor e oscila ao redor de uma média constante. As falhas são casuais e decorrentes de fatores menos controláveis, tais como: mau uso do equipamento, ultrapassagem de resistência ou fenômenos naturais imprevisíveis.
- E por fim, na fase de mortalidade senil ou desgaste, em que $\gamma > 1$, a taxa de falhas é crescente. Essas falhas são causadas por envelhecimento, degradação mecânica, elétrica ou química, fadiga, corrosão, ou vida de projeto muito curta. É o fim da vida útil do equipamento.

3.8 Uso da distribuição log-normal para os tempos de manutenção

A distribuição log-normal é muito usada em ciências físicas e sociais e em engenharia, neste último caso para descrever o tamanho de partículas, o tempo para haver uma falha no processo (confiabilidade) e o tempo para consertar algo no processo (manutenção).

Uma variável T , definida na faixa $0 < t < \infty$, tem uma distribuição log-normal se $\ln(T)$ for normalmente distribuída com média e desvio-padrão dados por:

$$\begin{aligned}\mu_{\ln T} &= E(\log(T)) \\ \sigma_{\ln T}^2 &= Var(\log(T))\end{aligned}\tag{3.20}$$

A função densidade de probabilidade da variável aleatória T é expressa por:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t) - \mu}{\sigma}\right)^2\right\}, \quad t > 0,\tag{3.21}$$

onde μ é a média do logaritmo do tempo de falha e σ é o desvio padrão.

Para a distribuição Log-normal, a função de sobrevivência $R(t)$:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{-\log(t) + \mu}{\sigma}\right)\tag{3.22}$$

O tempo médio de vida $E(T)$ e a variância $Var(T)$ são dados respectivamente por, por:

$$E(T) = \exp\left\{\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right\}\tag{3.23}$$

$$Var(T) = \{2\mu + \sigma^2\}(\exp\{\sigma^2\} - 1)\tag{3.24}$$

O percentil 100p%, ou vida residual, pode ser obtido a partir da tabela da normal padrão a partir de:

$$tp = \exp\{z_p\sigma + \mu\}\tag{3.25}$$

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA MCC

Chopra, Sachdeva e Shardwaj (2016) estudaram a relação entre os fatores de implementação da MCC e o aumento da produtividade nas indústrias têxtil, fertilizantes, farmacêutico, alimentício e bebidas na Índia. Para isso foi elaborado um questionário contendo perguntas a serem respondidas na escala Likert de quatro pontos (1- ganho nominal, 2- ganho razoável, 3- ganho alto e 4-ganho extremamente alto) e entregue a 100 empresas de pequeno, médio e grande porte, 64 empresas responderam. O questionário foi dividido em duas seções, a primeira tratou sobre os fatores da implementação da RCM e a segunda abordou os parâmetros de fabricação, ou seja de produtividade. O resultado comprovou que as empresas com maior nível de implementação da MCC possuem uma produtividade maior em comparação as empresas com menores níveis de implementação.

Gandhare, Akarte e Patil (2018) realizaram uma investigação empírica das práticas de gerenciamento do desempenho da manutenção em indústria de processamento de açúcar na Índia, mediante aos dados coletados, foram utilizados métodos estatísticos como a correlação, regressão múltipla e análise de cluster para atingir o objetivo do estudo que era entender as práticas de manutenções utilizadas e as diferenças no desempenho da manutenção entre as indústrias analisadas na pesquisa.

Sellitto, Borchardt e Araújo (2002) por meio da MCC e suas ferramentas como FTA (Análise de Árvore de Falhas), FMEA (Modo de Falha e Análise de Causa e Efeito) e Análise de Weibull determinaram o MTBF e o intervalo de tempo ideal entre os reparos ao analisar as embreagens de uma frota de ônibus de uma empresa de passageiros.

Na indústria metal-mecânica dentro da cadeia de suprimentos da indústria automobilística, Sellitto (2007) mapeou o processo e identificou os equipamentos para possibilitar a coleta dos tempos até a falha e os tempos até o reparo das máquinas. Com essas informações foi possível calcular o fator de forma γ e assim identificar em que ponto da curva da banheira o equipamento está situado e desta forma definir uma estratégia de para cada máquina da linha de produção.

Para analisar a coerência da estratégia de manutenção de uma indústria alimentícia, Komninakis (2017) aplicou a análise de confiabilidade com auxílio da modelagem estatística das distribuições de probabilidade Log-normal e Weibull dos tempos de reparo e dos tempos de falha de uma linha de produção composta de 6 máquinas de embalagens. O resultado da modelagem foi um fator de forma $\gamma < 1$ o qual situa os equipamentos na fase de mortalidade

infantil na curva da banheira o que implica a necessidade da adoção de estratégias de manutenção corretiva com foco na eliminação das causas reais dos defeitos de fabricação, de projeto, de instalação ou de operação.

Molina et al. (2017) por meio da MCC apresentou em seu trabalho uma proposta de aprimoramento do programa de manutenção elétrica no subsistema de água gelada de uma máquina extrusora de uma linha de produção de cabos flexíveis. No estudo foi proposto modificações pontuais no programa de manutenção e apresentado um comparativo entre o sistema operante e o apresentado pela metodologia MCC. O resultado foi ganhos expressivos considerando a redução de 12,53% do custo de manutenção (homens/hora/ano) com potencial para chegar a 31% após novas oportunidades de intervenções.

Em uma pesquisa na base científica SCIENC DIRECT no dia 19 de fevereiro de 2019 com as palavras *maintenance*, *industry* e *reliability* utilizando o algarismo booleano “e” entre elas, buscando no título, resumo e palavra-chave a sigla RCM em qualquer parte do texto considerando o período de 2009 a 2019, foram encontrados 31 artigos relacionados e após a análise por meio dos resumos foi observado que apenas 1 não correspondia as expectativas do trabalho, por se tratar de manutenção e confiabilidade em equipamentos hospitalares. Os demais sempre traziam informações pertinentes ao estudo e setores os quais a MCC é mais aplicado foram: aviação, cimento, elétrico, eólico, ferroviário, marítimo, mecânico, mineração, petróleo e gás, plantas de processos e térmico. Em vários desses artigos a MCC é citada como uma ferramenta já consolidada e de acordo com Aziz et al. (2019, p.349) “ o gerenciamento da manutenção com base na confiabilidade já é uma técnica comprovada”, indústrias como dos setores de energia nuclear, aviação, automóvel, *offshore* já integram o conceito de confiabilidade no início do projeto (HAMEED; VATN; HEGGSET, 2011). Por isso a metodologia MCC nesses artigos está como uma forma de validação estruturada de diversas outras novas abordagens como: gravata borboleta, RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability and Safety*), CIBOCOF (*Center for Industrial Management Maintenance Concept Development Framework*), AHP (*Analytical Hierarchy Process*), PSO (Optimização por exame de partículas) e RRCM (*Reliability and Risk Centered Maintenance*), ou seja, internacionalmente a MCC deixou de ser o objeto de estudo para ser o suporte das novas ferramentas. Na sequência uma breve revisão bibliográfica dos principais artigos selecionados durante a pesquisa

Para verificar a melhor tomada de decisão para a manutenção em equipamentos em usinas de energia, com turbinas a gás (GTPP), com turbinas a vapor (STPP) e com ciclo

combinado (CCPP), Sabouhi et al. (2016) relatou o uso da confiabilidade para quantificar a criticidade e a importância de cada componente individual no desempenho da confiabilidade do sistema de geração de energia. Para isso foi necessário à identificação dos arranjos em série e paralelo dos componentes e posteriormente elaborar uma análise dos índices de confiabilidade geral do sistema como a taxa de reparo, tempo médio de ciclo do sistema (TMC), tempo médio de inatividade do sistema (TMI), tempo médio para falha prematura (MTTF1) e tempo médio para falha (MTTF). Essa abordagem auxiliou os operadores e gerentes a compreender a importância de cada componente no desempenho geral da planta e mostrar que o sistema STPP é mais confiável, seguido pelo GTPP e o CCPP.

Vishnu e Regikumar (2016) elaboraram um modelo geral de RCM que é adequado para todos os tipos de plantas de processos com subsistemas complexos interligados e componentes críticos, para isso foi elaborado uma estrutura seguindo a metodologia baseada na AHP para desenvolver um sistema de banco de dados que monitora as ações de manutenção e as informações dos equipamentos para assim definir formas econômicas para aumentar a disponibilidade e lucratividade da indústria.

Heo (2014) apresentou um modelo de Manutenção Centrada na Confiabilidade baseada na PSO (Otimização por exame de partículas) que analisou a política de manutenção do setor de energia elétrica para manter a confiabilidade e analisar as falhas potenciais em componentes dos sistemas de transmissão em subestações. O objetivo foi encontrar uma estratégia ideal de manutenção pela comparação da MCC e as atuais estratégias adotadas, Manutenção Baseada no tempo e a manutenção baseada na condição. O resultado provou que a MCC possui o melhor custo benefício que as demais.

Selvik (2011) para motivar e descrever as principais características da RRCM uma extensão da RCM, a qual prioriza as incertezas e riscos ao invés da confiabilidade e probabilidades (valores esperados) analisou a aplicabilidade desta metodologia na determinação da estratégia de manutenção de um arranjo submarino “*flow line*” de uma indústria offshore de petróleo e gás no Mar do Norte. Ao adicionar recursos adicionais para a metodologia RCM como à avaliação das incertezas pode-se obter informações mais completa em um contexto mais amplo e assim subsidiar com dados mais completos os tomadores de decisão em comparação ao método tradicional da RCM.

Para Aziz (2019) o planejamento e o gerenciamento da manutenção com base na confiabilidade é uma realidade consolidada e a prática é comum em operações marítimas, desta forma não é incomum estudos sobre essa metodologia. Em seu artigo é apresentado uma

abordagem prática e estruturada conhecida como metodologia da gravata borboleta para avaliar e quantificar os riscos relativos a diferentes sistemas de um navio. A utilização desta metodologia foi possível, pois os dados de falha e as probabilidades de falhas foram calculados a partir do banco de dados histórico do navio e a confiabilidade foi utilizada para validar o modelo. Desta forma essa estrutura poderia servir como uma ferramenta útil para gerenciar a segurança de uma embarcação com relação aos riscos quantitativos e no auxílio na priorização eficaz dos recursos e na prevenção de eventos indesejados.

Pela perspectiva de novas abordagens de manutenção, Waeyenbergh (2009) desenvolveu um conceito que pode ser personalizado e específico para cada empresa. O modelo CIBOCOF fornece subsídios para a escolha da política e modelo de manutenção mais apropriada, de forma mais simples e prática que os modelos descritos pela literatura. O desenvolvimento dessa ferramenta foi possível devido aos modelos matemáticos e árvores de decisão propostas pela RCM. Em seu trabalho foi realizado um estudo de caso com a implementação da CIBOCOF em uma empresa que produz produtos de iluminação e os conceitos apresentados na pesquisa atenderam a diversas áreas problemáticas da empresa e também forneceram informações úteis para o desenvolvimento de uma manutenção estruturada.

Hameed, Vantn e Heggset (2011) identificou a necessidade de um banco de dados com informações necessárias para a implementação de uma engenharia RAMS para a elaboração de um projeto confiável de diminuição de paradas e uma produção estável em parques Eólicos marinhos. Esse estudo foi fomentado devido a dificuldades de se obter detalhes de falhas e outros incidentes, pois os fornecedores de turbinas eólicas dificultam e até mesmo sonegam a divulgação de informações por meio de contratos firmados com os proprietários. Os benefícios dessa aplicação seriam subsídios para as tomadas de decisões técnicas e gerenciais, pois haveria um banco de dados comum que permitiria previsões estatísticas confiáveis, informações sobre operadores, fabricantes e oportunidades de otimizar o desempenho dos parques eólicos offshore e o novas metodologias de manutenções.

5 METODOLOGIA

O processo de investigação científica contempla a fase de organização do pacote metodológico, que deve ser concebido por meio da escolha dos métodos e técnicas coerentes com o problema e a questão da pesquisa (BERTO; NAKANO, 2014). No exercício da pesquisa o método e a técnica são complementares e indissociáveis, o método deve mostrar o percurso e a técnica fornece o transcurso até o resultado (BERTO; NAKANO, 2014).

Para Miguel (2007), a escolha do método é uma das principais decisões na condução de um processo de pesquisa. Isso pode ser justificado pela necessidade de embasamento científico adequado, o que é caracterizado pela busca de melhores abordagens de pesquisa, métodos e técnicas para o planejamento e condução do trabalho (MIGUEL, 2007). O resultado são trabalhos estruturados que podem ser replicado e aperfeiçoado por outros pesquisadores (MIGUEL, 2007).

Ainda para Miguel (2007), uma pesquisa para ser classificada como científica, ela deve possuir a responsabilidade de prosseguir e avançar no conhecimento já existente e não criar conhecimento descolado do que já foi estudado e divulgado pela literatura especializada. Métodos de procedimentos são etapas mais concretas da investigação com o objetivo de explicar os fenômenos de forma menos abstrata, pode-se dizer que são técnicas que pelo uso mais abrangente se transformaram em métodos (MARCONI; LAKATOS, 1985). A escolha do método prepara a maneira como o problema de pesquisa será abordado (BERTO; NAKANO, 2014).

O método científico utilizado neste estudo, de acordo com as afirmações de Fachin (2001) é histórico devido à explicação de uma situação no passado. O método histórico investiga fatos ocorridos no passado para verificar sua influência na sociedade atual, pois as instituições são influenciadas pelo contexto o qual estão inseridos ao longo do tempo e para compreender o papel que atualmente desempenham na sociedade é necessário remontar aos períodos de sua formação e de suas modificações. Também de acordo com Marconi e Lakatos (1985) as variáveis são de ordem temporal, pois de forma lógica o acontecido depois, não pode ter tido influência no que ocorreu antes, ou seja, isto é, a variável anterior é independente e a posterior é dependente. Como na teoria citada acima, neste trabalho são utilizados os dados históricos de 6 anos safras do período de 2012 a 2017, esses dados foram divididos e analisados

de forma anual e mensal na tentativa de encontrar a explicação para o ocorrido, identificar os desvios que ainda persistem e propor uma solução.

Para Berto e Nakano (2014) uma pesquisa descritiva tem como objetivo descrever fenômenos ou situações por meio de observações e detalhes e assim determinar um perfil. A pesquisa descritiva deste estudo pretende elaborar um modelo estatístico por meio das análises dos tempos de reparo e dos tempos entre falhas para descrever o comportamento e elaborar um perfil com suas características.

Do ponto de vista da abordagem, esta pesquisa é quantitativa, pois utiliza a investigação e descrição de fenômenos explícitos com objetivos lastreados pela quantidade de ocorrências e a modelagem estatística utiliza habilidades matemáticas para desenvolver um modelo que descreve e representa o funcionamento de um sistema ou parte dele (BERTO; NAKANO, 2014).

5.1 Tipos de Pesquisa

De acordo com Berto e Nakano (2014) as técnicas de pesquisas mais usuais no desenvolvimento de pesquisas em Engenharia de Produção estão agrupadas em função da abordagem qualitativa, quantitativa ou mista. As técnicas são:

- Levantamento (Survey): prioriza a coleta de dados quantitativos provenientes de grandes amostras. Aplica técnicas de amostragens e análises estatísticas. Para a coleta de dados geralmente utiliza como instrumento o formulário ou o questionário.
- Estudo de caso: descrição e estudo detalhado de um ou mais casos ou objetos de estudo. Utiliza vários instrumentos de coleta de dados e também inclui a integração entre pesquisador e objeto de pesquisa.
- Modelagem (ou modelamento): utilização de técnicas matemáticas para descrever um modelo matemático do funcionamento de um sistema produtivo;
- Simulação: utilização de técnicas matemáticas e computacionais para a simulação de um sistema produção;
- Estudo de campo: utiliza principalmente dados primários de natureza qualitativa ou dados primários sem estruturação formal;
- Experimento: Sob condições controladas pelo pesquisador estuda as relações de causa e efeito entre duas ou mais variáveis;

- Teórico-conceitual: Por meio da literatura publicada e revisões bibliográficas é analisado textos, discussões análises conceituais, não há presença de dados de campo.

O método utilizado é a modelagem, pois as distribuições de probabilidade são fundamentais nas atividades da MCC, as quais não podem ser analisadas por valores médios, mas sim entender como tempos médios até a falha e os tempos médios de reparo se distribuem e desta forma calcular a confiabilidade do equipamento.

5.2 Procedimentos operacionais

Nesta seção são apresentados os 10 passos para o desenvolvimento desta dissertação.

Passo 1: Estudo teórico sobre manutenção, descrevendo sua evolução, políticas e tipos. Nesta etapa também é analisado a confiabilidade com suas funções, modelos quantitativos e paramétricos;

Passo 2: Caracterização da Empresa e coleta dos dados do período de 5 anos. Esses registros contém os tempos entre falhas e os tempos de reparo relacionados a diferentes equipamentos da unidade industrial os quais podem interromper o processo produtivo com a parada da moenda. Para esse estudo os dados foram divididos em anos (2012, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017) e meses (Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto, Setembro, Outubro, Novembro, Dezembro), desta forma a análise deve ser realizada contemplando essa separação que faz-se complementar para o desenvolvimento do trabalho.

Passo 3: Análise estatística preliminar dos dados coletados para posterior modelagem da confiabilidade.

Passo 4: Realização dos testes de aderência para se determinar a distribuição de probabilidade que melhor descreve os dados da amostra.

Passo 5: Por meio do uso do modelo Log-Normal e Weibull, estimar os dados de tempo de reparo (TTR) e tempo entre falhas (TBF), assim como as estatísticas descritiva (média, mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação) para ambos.

Passo 6: Por meio do uso do modelo Weibull, modelar a função de confiabilidade e taxas de falha para os dados de tempo entre falhas (TBF) e calcular tempo médio entre falhas (MTBF) dos equipamentos, junto com a análise estatística descritiva. O cálculo do tempo médio de reparo (MTTR) e análise descritiva foram realizadas mediante o modelo Log-Normal.

Passo 7: Por meio do tempo médio de reparo (MTTR), tempo médio entre as falhas (MTBF) calculados pelo modelo de Weibull, 4 parâmetros foram determinados: Disponibilidade dos Equipamentos, Confiabilidade dos equipamentos funcionarem por pelo

menos 24 horas antes de apresentarem falhas, o tempo provável (horas) em que 50% dos equipamentos apresentarão falhas e o parâmetro de forma (γ).

Passo 8: Por meio dos resultados obtidos foi analisado os comportamentos dos 7 parâmetros da modelagem estatística (MTBF, MTTR, Disponibilidade, Confiabilidade, Taxa de falha, número de ocorrências e parâmetro de forma (γ)) e o provável posicionamento no gráfico de ciclo de vida da curva da banheira em cada período analisado. Em conjunto é analisado a evolução anual e mensal da manutenção sob a perspectiva dos desse parâmetros.

Passo 9: Comparação dos resultados da modelagem da análise da confiabilidade (estratégia atual) com a estratégia recomendada pela literatura.

Passo 10: Conclusões.

6 MODELAGEM ESTATÍSTICA DA CONFIABILIDADE

6.1 Caracterização da Empresa

A empresa estudada é uma usina de cana de açúcar localizada no interior de São Paulo com fundação no início do século XX. No decorrer dos anos passou por inúmeras reformas e ampliações. Seu parque industrial tem capacidade diária de moagem de cana de açúcar de 1.300.000 toneladas de cana por safra com produção diária de 20.000 sacas de açúcar de 50 kg com geração de 4,4 MWh de energia elétrica. A indústria possui cerca de 120 funcionários, sendo que 30 são dedicados exclusivamente à manutenção da planta que funciona 24 horas por dia, sete dias por semana, em períodos conhecidos como safra e entressafra, conforme histórico do setor e condições climáticas.

Essa usina de açúcar possui apenas uma moenda e vários outros equipamentos como Caldeiras a vapor, Evaporadores, Cozedores, turbinas, geradores de eletricidade, esteiras, bombas, redutores, motores, decantadores, centrifugas, secadores de açúcar e compressores de ar, ventiladores e exaustores os quais trabalham de forma individual ou em conjunto, porém interligados ao complexo circuito de vapor, água, caldo de cana, energia elétrica, ar comprimido e/ou óleo. A moenda é composta de 6 ternos cada um contendo 4 rolos, esteiras de arraste as quais transferem o bagaço de cana de um terno para o outro e bombas. O seu acionamento é feito por meio de turbinas a vapor acoplados a grandes redutores de velocidade. Função da moenda é esmagar a cana e extrair o caldo para posterior fabricação do açúcar.

A moenda é afetada diretamente pelas variações de processo e falha da maioria dos equipamentos industriais, por isso é um equipamento sensível e suscetível a paradas e interrupções por falhas ocasionadas por ela mesma ou por outros equipamentos. Desta forma, todas as alterações de rotação ou paradas desse equipamentos são registradas, pois os indicadores como a disponibilidade e o aproveitamento industrial são medidos considerando o tempo de funcionamento da moenda e pela quantidade de cana moída naquele dia.

Os registros de alteração de rotação e paradas da moenda são bem detalhados e contém as seguintes informações como exemplo:

1. Denominação Grupo de Code (Causa) – Departamentos da Companhia que ocasionaram a parada:
 - a. Agrícola
 - b. Industria

- c. Administrativo
2. Dano – (Motivo pelo qual o equipamento parou)
- a. Aproximadamente 725 sintomas como quebra mancal; curto circuito, desarme motor elétrico, desalinhamento
3. Denominação do Code (Causa) - (Setor dentro do departamento causador da parada da Moenda)
- a. Manutenção Elétrica
 - b. Manutenção Mecânica
 - c. Manutenção Instrumentação
 - d. Operacional – Fábrica
 - e. Operacional – Recepção/ Preparo e Moagem
 - f. Operacional – Geração de Energia
4. Local de Instalação afetado – (Qual equipamento falhou ocasionando a parada da moenda).
- a. Aprox. 1.000 equipamentos, desde motores, bombas e caldeiras.

Todos esses registros são armazenados no banco de dados da companhia e o quadro abaixo é a forma como eles podem ser extraídos para serem consultados.

Quadro 2 - Registro de Alteração e parada de Moenda

Denominação Grupo de Code (Causa)	Denominação Code (Dano)	Duração da Parada	Denominação Code (Causa)	Local Instalação Afetado	Início Avaria	Hora Início Avaria	Fim da Avaria	Hora do Fim Avaria	Número Nota PM
Parada por Motivos Indústria	Filtro óleo turbina/redutor sujo	0,77	Manutenção Mecânica	CONJUNTO DE ACIONAMENTO 1º TERNO	04/04/2017	15:04:00	04/04/2017	15:50:00	11950441
Parada por Motivos Indústria	Excesso de água de embebição	0,33	Operacional - Recepção/Preparo/Moagem	BOMBEAMENTO EMBEBIÇÃO	04/04/2017	20:00:00	04/04/2017	20:20:00	11950443
Parada por Motivos Indústria	Embuchamento de cana/Bagaço	0,73	Operacional - Recepção/Preparo/Moagem	ESTEIRA INTERMEDIÁRIA 04	05/04/2017	6:16:00	05/04/2017	7:00:00	11951297
Parada por Motivos Indústria	Quebra do eixo de acionamento	0,67	Manutenção Mecânica	ESTEIRA INTERMEDIÁRIA 02	05/04/2017	12:50:00	05/04/2017	13:30:00	11951301
Parada por Motivos Indústria	Falha na polia do motor	1,22	Manutenção Elétrica	ESTEIRA INTERMEDIÁRIA 05	16/04/2017	12:32:00	16/04/2017	13:45:00	11959734

Fonte: Próprio Autor (2020)

No período de safra, compreendido entre o início do mês de abril e início de dezembro, a usina opera de forma integral e constante, com paradas mensais periódicas de 6 horas destinada a substituição do jogo de martelo do equipamento conhecido como desfibrador de cana, neste pequeno intervalo de tempo ocorrem as manutenções programadas devido a oportunidade da planta industrial estar parada. Na safra também é comum a ocorrência da manutenção corretiva emergencial e ainda neste período tem-se o planejamento da manutenção de entressafra, a qual utiliza como base do planejamento dados históricos e a experiência dos operadores mais antigos.

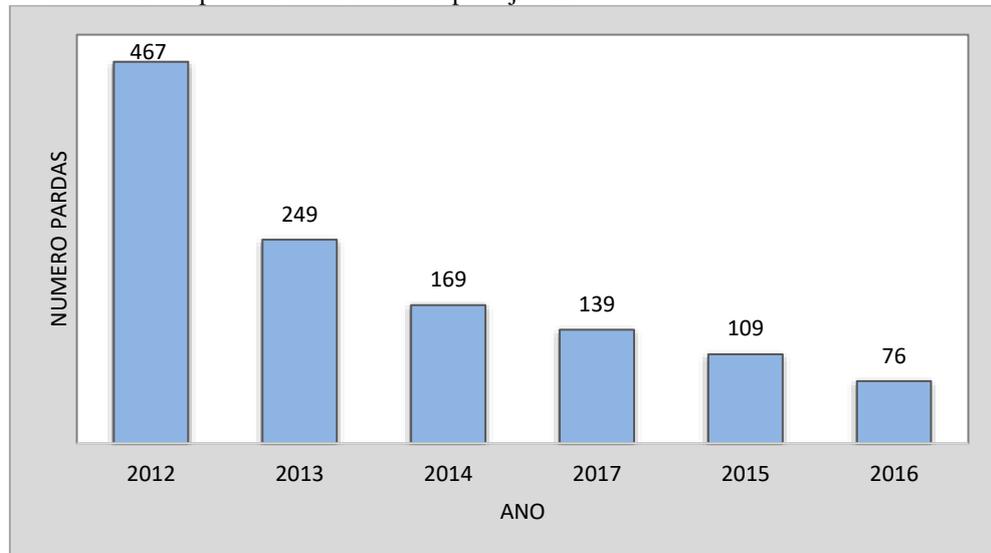
Na entressafra, início do mês de dezembro e final do mês de março, a operação da indústria está totalmente paralisada, devido término da colheita de cana de açúcar. Por isso, a indústria está disponível e neste momento a preventiva é utilizada de forma intensiva, de acordo com o planejamento e o orçamento previamente estabelecido durante a safra.

6.2 Definição da Amostra

Os dados coletados para a análise estatística deste trabalho consistem de 1.208 registros de paradas de moenda por motivos industriais no período de maio de 2012 a outubro de 2017, divididos em seis anos de safra. Esses registros contêm os tempos entre falhas (TBF) e os tempos de reparos (TTR) relacionados a diferentes equipamentos que podem interferir com a paralização da indústria, ou seja, neste momento o processo de moagem é interrompido e a moenda é parada.

O registro dos dados de paradas da moenda no sistema da empresa é bem detalhado, porém durante o período analisado houve mudanças na árvore de equipamentos do ERP (*Enterprise Resource Planning*) de Gestão, atrasos no registro de novos equipamentos instalados na planta, inclusão de novos ofensores ou causadores das falhas e até mesmo a inclusão de novas oficinas de manutenção. Desta forma optou-se por analisar somente os anos e meses, dificultando assim o entendimento mais aprofundado das falhas de origem. A Figura 2 apresenta o gráfico com valores decrescentes identificando a quantidade de paradas industriais (não planejadas) com a causa apontada como manutenção, ou seja, quantidade medida por meio da soma dos tempos de reparo (TTR).

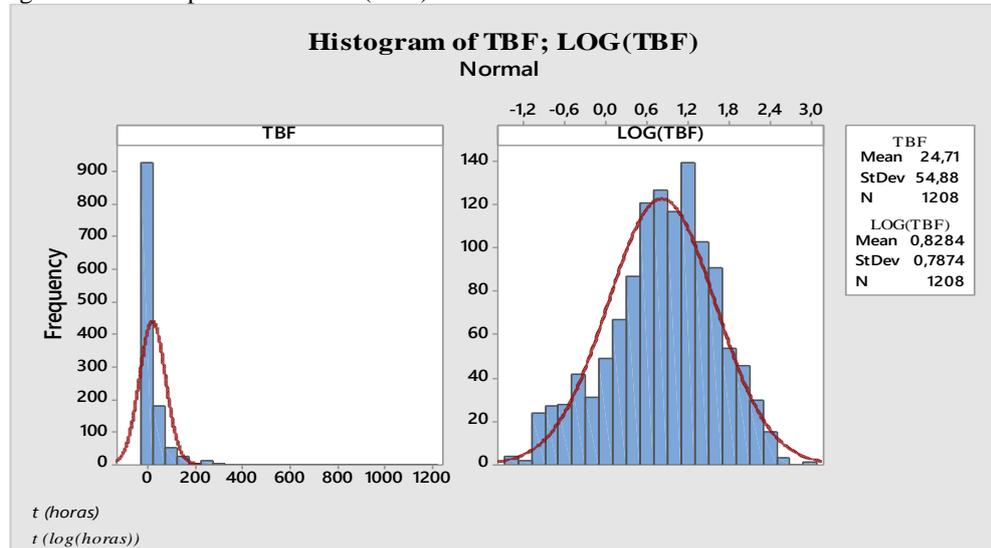
Figura 2 - Gráfico de Pareto das paradas industriais não planejadas.



Fonte: Próprio Autor (2020)

Na Figura 3 são apresentados os histogramas dos tempos entre falhas denotados por TBF na escala original e escala logarítmica para os 1208 registros.

Figura 3- Histogramas dos tempos entre falhas (TBF)

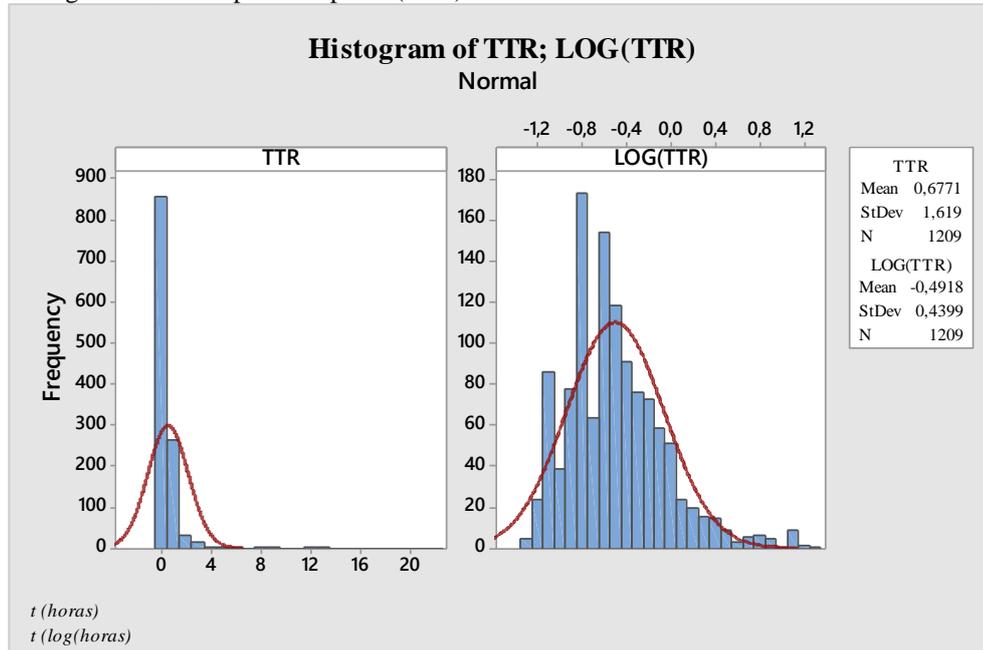


Fonte: Próprio Autor (2020)

Na Figura 4 são apresentados os histogramas dos tempos de reparo denotados por TTR na escala original e escala logarítmica para os 1209 registros.

Das Figuras 3 e 4 conclui-se que os dados transformados para a escala logarítmica apresentam melhor normalidade (simetria).

Figura 4- Histogramas dos tempos de reparos (TTR).



Fonte: Próprio Autor (2020)

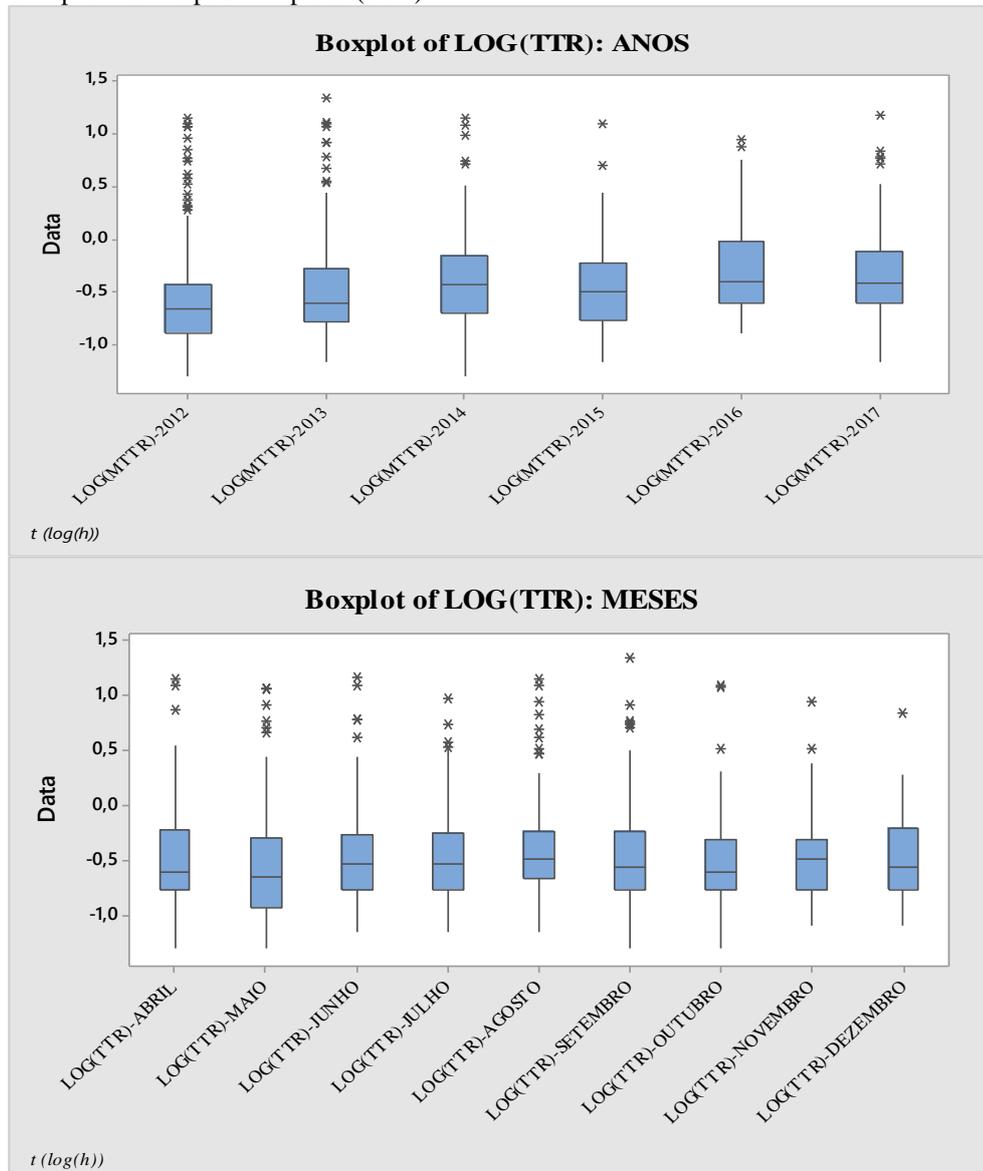
6.3 Boxplot dos Tempos de reparo (TTR)

A Figura 5 apresenta os box-plots dos tempos de reparos (TTR) transformados para a escala logarítmica considerando-se alguns dos fatores reportados nos registros de falhas da empresa. Neste trabalho dados mensais são um agrupamento de todos os meses ao longo do período, por exemplo, o mês de abril do gráfico contém todas as paradas desse mês durante os 7 anos analisados.

Dos gráficos da Figura 5, tem-se algumas conclusões preliminares:

- Grupo de meses: tempos de reparos aparentemente similares entre os vários meses.
- Grupo de anos: tempos de reparos aparentemente similares entre os vários anos.

Figura 5- Box-plot dos tempos de reparos (TTR).



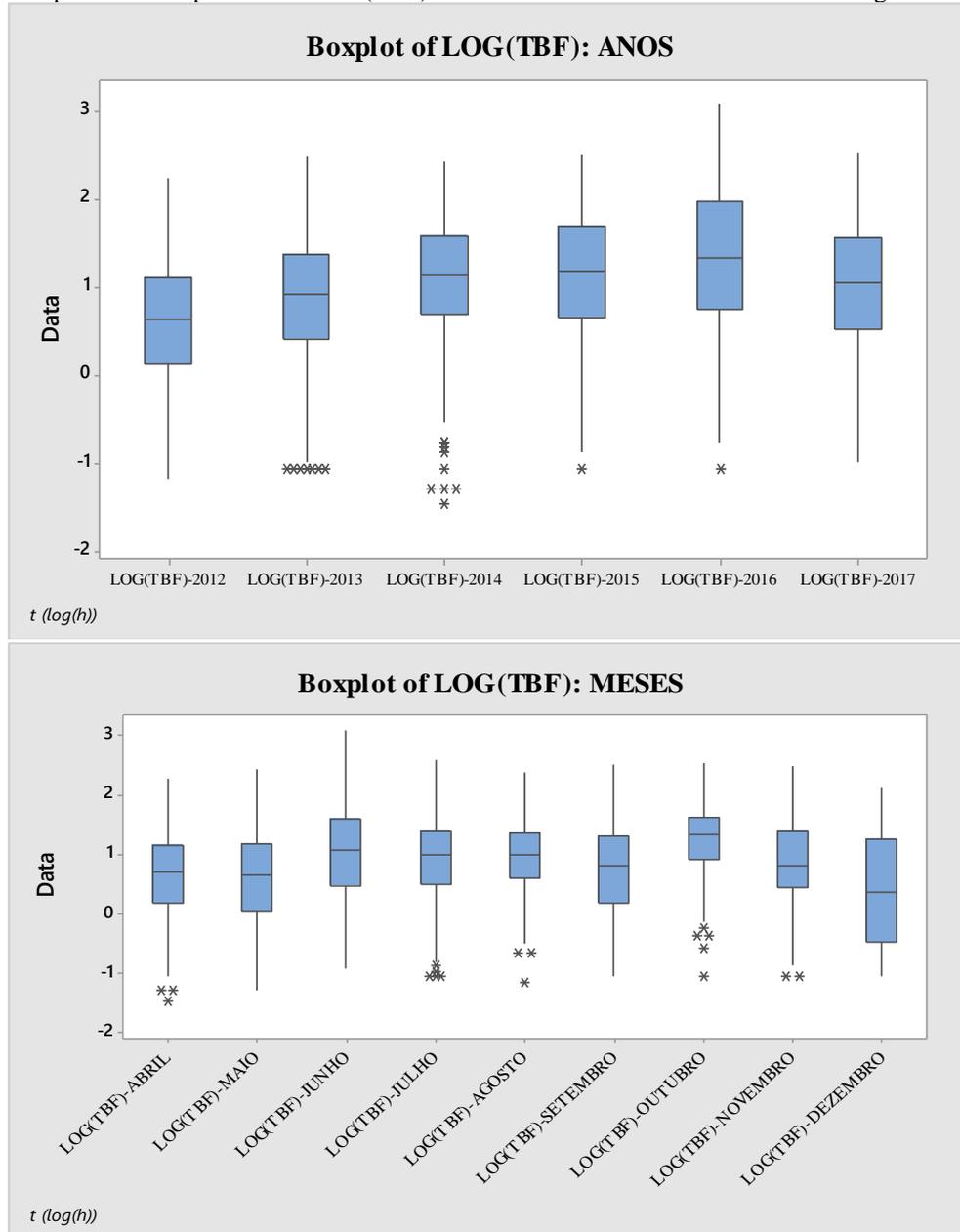
Fonte: Próprio Autor (2020)

6.4 Boxplot do Tempo entre falhas (TBF)

Na Figura 6 são os box-plots dos tempos entre falhas (TBF) para todos os equipamentos que falharam e interromperam o funcionamento da moenda e conseqüentemente pararam o processo industrial. Os dados estão transformados para a escala logaritmica e dos gráficos da Figura 6, tem-se algumas conclusões preliminares:

- Grupo de anos: tempos entre falhas aparentemente maior para o ano de 2016.
- Grupo de meses: tempos entre falhas aparentemente maior para o mês de outubro.

Figura 6- Box-plots dos tempos entre falhas (TBF) nos níveis dos fatores considerados nos registros de falhas.



Fonte: Próprio Autor (2020)

6.5 Uso de um modelo de análise de variância (ANOVA) para comparar as médias de TTR e TBF

Para verificar estatisticamente se há diferenças significativas entre as médias de TTR e TBF para os diferentes fatores considera-se o uso de um modelo de análise de variância com uma classificação. A Análise de Variância (ANOVA) é uma metodologia estatística para testar se um determinado fator tem efeito significativo sobre a variável dependente Y. Supondo μ_j representando o verdadeiro valor da média da variável dependente classificada em diferentes

níveis de um fator, significa que, para o nível j , a técnica de ANOVA testa a hipótese de que não existem diferenças entre as médias μ_j , assumindo que não há diferenças entre a variabilidade das observações em cada grupo (variância constante).

6.5.1 ANOVA para Tempos de reparo (TTR)

A Tabela 1 e 2 apresenta os resultados de ANOVA com uma classificação para comparar as médias de TTR na escala logarítmica obtidos usando o software Minitab® versão 16.

Tabela 1- ANOVA para log(TTR) – Dados ANOS

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	5	14,2	2,84	15,56	< 0,001
Error	1203	219,61	0,1826		
Total	1208	233,81			

Fonte: Próprio Autor (2020)

Tabela 2- ANOVA para log(TTR) – Dados MESES

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	8	2,029	0,2537	1,31	0,232
Error	1200	231,779	0,1931		
Total	1208	233,809			

Fonte: Próprio Autor (2020)

Dos resultados acima, observa-se que para o fator mês não há diferenças significativas entre as médias de TTR na escala logarítmica (valor- $p > 0,05$) por isso não serão realizadas mais análises, já que não existe diferenças significativas neste indicador. Para o fator ano há diferenças significativas entre as médias (valor- $p < 0,05$). As suposições necessárias para validação das inferências no modelo de ANOVA foram verificadas a partir de gráficos dos resíduos (normalidade e variância constante dos resíduos).

6.5.2 ANOVA para Tempos entre falhas (TBF)

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados de ANOVA com uma classificação para comparar as médias de TBF na escala logarítmica.

Dos resultados das tabelas abaixo, observa-se que nos fatores Ano e Mês há diferenças significativas entre as médias (valor- $p < 0,05$), por isso merecem ser analisadas de forma detalhada para entender as causas. As suposições necessárias para validação das inferências no

modelo de ANOVA foram verificadas a partir de gráficos dos resíduos (normalidade e variância constante dos resíduos).

Tabela 3- ANOVA para log (TBF): Dados ANO

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	5	70,08	14,0166	24,84	< 0,001
Error	1202	678,26	0,5643		
Total	1207	748,34			

Fonte: Próprio Autor (2020)

Tabela 4- ANOVA para log (TBF): Dados MÊS

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	8	47,45	5,9309	10,15	< 0,001
Error	1199	700,9	0,5846		
Total	1207	748,34			

Fonte: Próprio Autor (2020)

6.6 Construção do modelo de análise de confiabilidade

Com o uso dos modelos de confiabilidade para os dados na escala original serão estimadas as médias de TTR e TBF por meio da análise das informações obtidas do banco de dados da empresa.

6.6.1 Estimadores de Verossimilhança (EMV) para os tempos de reparos

Inicialmente será considerada uma análise de confiabilidade para os dados TTR para todos os dados assumindo duas distribuições populares de confiabilidade: a distribuição de Weibull e a distribuição log-normal. Os estimadores dos parâmetros das distribuições paramétricas são obtidos usando o método de máxima verossimilhança (EMV) e obtidos usando métodos iterativos numéricos e o software Minitab® versão 16 conforme Tabelas 5 e 6.

Tabela 5- EMV para os parâmetros da distribuição de Weibull (TTR) em horas.

Parameter	Standard 95,0% Normal CI			
	Estimate	Error	Lower	Upper
Shape	0,7941	0,0148354	0,765546	0,823713
Scale	0,55811	0,021526	0,517474	0,601935
Mean(MTTR)	0,63573	0,0230251	0,592164	0,682497
Standard Deviation	0,80779	0,0336488	0,744462	0,87651
Median	0,35178	0,0148861	0,323782	0,382201

Fonte: Próprio Autor (2020)

Também, assumir a distribuição log-normal para obtenção das curvas de confiabilidade estimadas pelo método de máxima verossimilhança para os tempos de reparo TTR nos diferentes níveis dos fatores mês e ano reportados no banco de dados; as médias de TTR são apresentadas na Tabela 6.

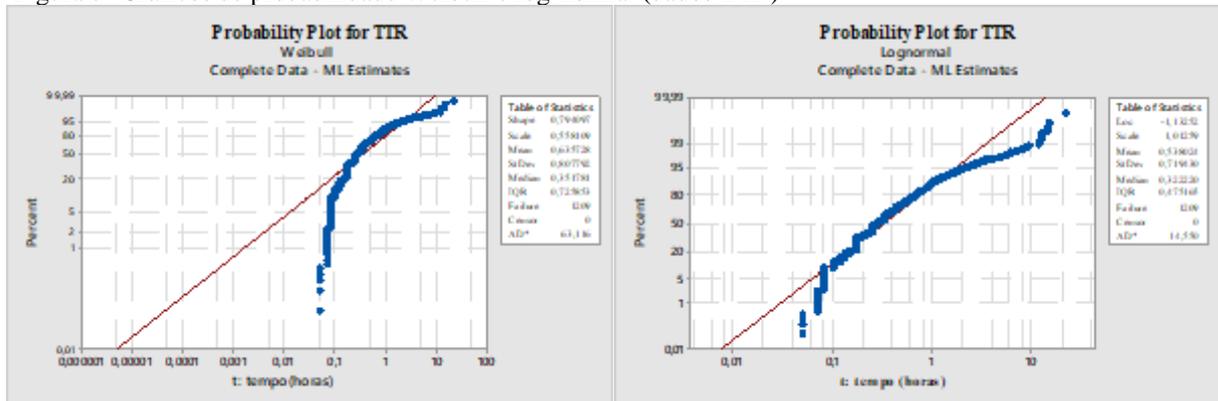
Tabela 6- EMV para os parâmetros da distribuição de Log-normal (TTR) em horas.

Parameter	Standard 95,0% Normal CI			
	Estimate	Error	Lower	Upper
Location	-1,1325	0,0291219	-1,1896	-1,07544
Scale	1,01259	0,0205923	0,973022	1,05376
Mean(MTTR)	0,53802	0,0192705	0,501549	0,57715
StandardDeviation	0,71943	0,0437369	0,638618	0,810469
Median	0,32222	0,0093837	0,304344	0,341147

Fonte: Próprio Autor (2020)

Na Figura 7 são apresentados os gráficos de probabilidade Weibull e log-normal obtidos a partir dos modelos ajustados pelos estimadores de máxima verossimilhança. Dos gráficos da Figura 7, observa-se que a distribuição log-normal é melhor ajustada pelos dados (pontos mais próximos da reta no gráfico de probabilidade normal).

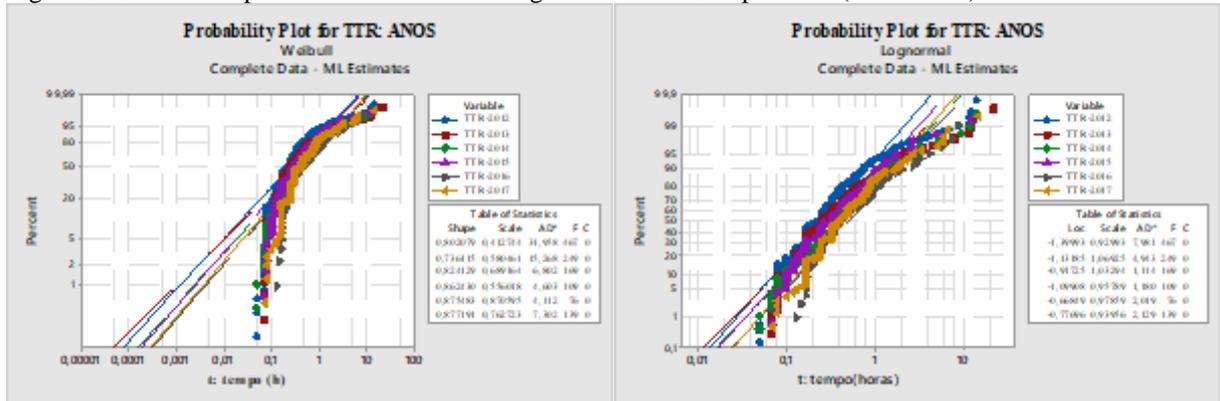
Figura 7- Gráficos de probabilidade Weibull e log-normal (dados TTR)



Fonte: Próprio Autor (2020)

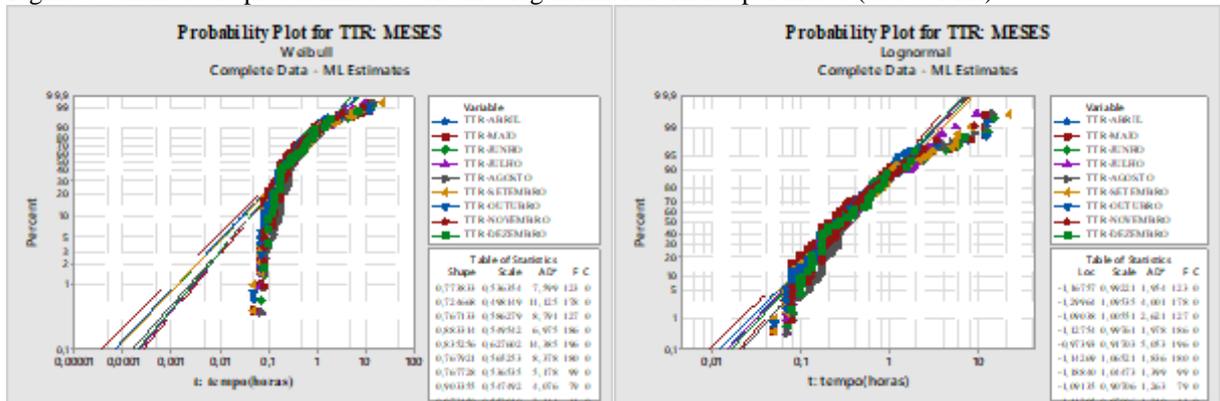
Resultados semelhantes são encontrados quando analisamos anual e mensalmente de acordo com as Figuras 8 e 9, ou seja, pontos mais próximos da reta.

Figura 8- Gráficos de probabilidade Weibull e log-normal divididos por anos (dados TTR)



Fonte: Próprio Autor (2020)

Figura 9- Gráficos de probabilidade Weibull e log-normal divididos por meses (dados TTR)



Fonte: Próprio Autor (2020)

Na Tabela 7 e 8, observa-se que as médias maiores para TTR (tempos de reparo) nos fatores mês e ano são dados respectivamente agosto e 2016.

Tabela 7- EMV médias anuais dos tempos assumindo a distribuição log-normal (TTR) para os anos, resultados em horas..

		Standard 95,0% Normal CI				
Parameter		ANO	Estimate	Error	Lower	Upper
Mean	(TTR)	2012	0,380012	0,019571	0,343526	0,420374
Mean	(TTR)	2013	0,571094	0,048514	0,483503	0,674554
Mean	(TTR)	2014	0,681291	0,067036	0,561796	0,826203
Mean	(TTR)	2015	0,527131	0,058414	0,424222	0,655004
Mean	(TTR)	2016	0,827234	0,112922	0,633045	1,08099
Mean	(TTR)	2017	0,714932	0,068403	0,592685	0,862393

Fonte: Próprio Autor (2020)

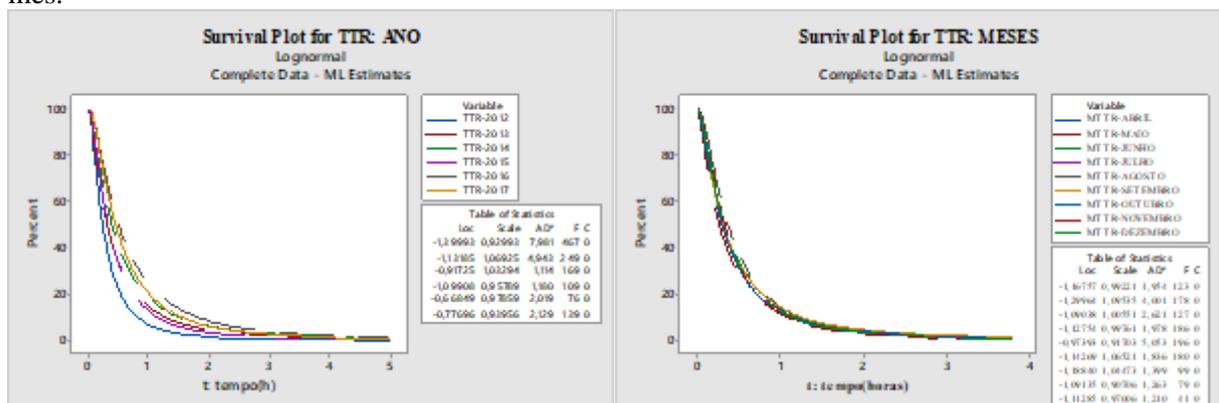
Tabela 8- EMV para as médias mensais assumindo a distribuição log-normal (TTR) para os meses, resultados em horas.

		Standard 95,0% Normal CI				
Parameter	Mês	Estimate	Error	Lower	Upper	
Mean (TTR)	Abril	0,509	0,0556	0,4108	0,6306	
Mean (TTR)	Maio	0,4967	0,0516	0,4052	0,6088	
Mean (TTR)	Junho	0,5572	0,061	0,4496	0,6905	
Mean (TTR)	Julho	0,5326	0,0477	0,4469	0,6348	
Mean (TTR)	Agosto	0,575	0,0449	0,4934	0,67	
Mean (TTR)	Setembro	0,5625	0,0559	0,4629	0,6835	
Mean (TTR)	Outubro	0,5259	0,0687	0,4072	0,6792	
Mean (TTR)	Novembro	0,5066	0,0614	0,3995	0,6425	
Mean (TTR)	Dezembro	0,5261	0,0966	0,367	0,7541	

Fonte: Próprio Autor (2020)

Na Figura 10 são apresentadas as curvas estimadas de confiabilidade dos tempos de reparos (MTTR) nos diferentes níveis dos fatores anos e mês.

Figura 10- Curvas estimadas de confiabilidade dos tempos de reparos (TTR) para os fatores anos e mês.



Fonte: Próprio Autor (2020)

6.6.2 Estimadores de Verossimilhança (EMV) para os tempos entre falhas

Inicialmente consideramos uma análise de confiabilidade para os dados TBF (tempos entre falhas) para todos os dados assumindo a distribuição de Weibull e a distribuição log-normal. Os estimadores dos parâmetros das distribuições paramétricas são obtidos usando o método de máxima verossimilhança (EMV) e obtidos usando métodos iterativos numéricos e o software Minitab® versão 16, conforme Tabela 9 e 10.

Tabela 9- EMV para os parâmetros da distribuição de Weibull (TBF).

Parameter	Standard 95,0% Normal CI			
	Estimate	Error	Lower	Upper
Shape	0,617251	0,0132626	0,591796	0,6438
Scale	16,1191	0,794717	14,6344	17,7545
Mean(MTBF)	23,3968	1,11744	21,306	25,6927
Standard Deviation	39,7172	2,35736	35,3555	44,6171
Median	8,90152	0,487833	7,99494	9,91089

Fonte: Próprio Autor (2020)

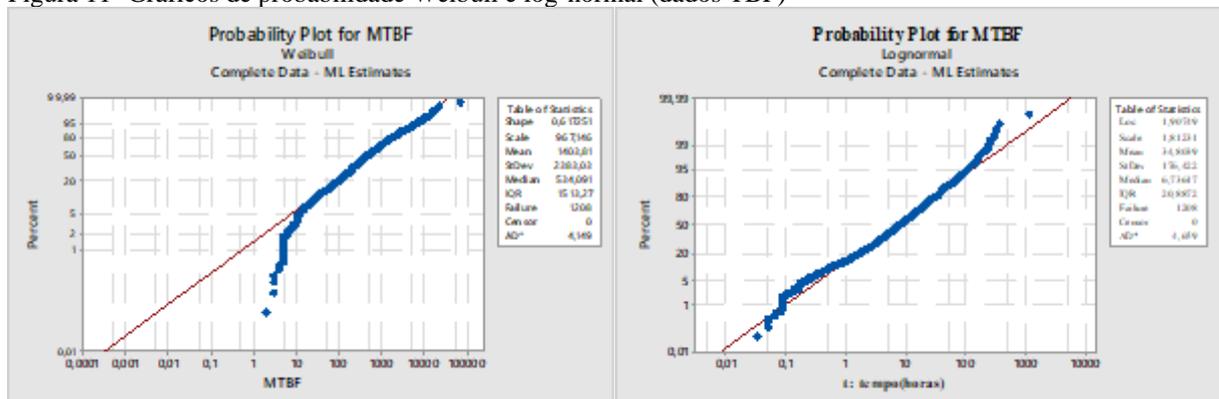
Tabela 10- EMV para os parâmetros da distribuição de Log-normal (TBF).

Parameter	Standard 95,0% Normal CI			
	Estimate	Error	Lower	Upper
Location	1,90749	0,0521434	1,80529	2,00969
Scale	1,81231	0,036871	1,74147	1,88604
Mean(MTBF)	34,8039	2,94994	29,4768	41,0937
Standard Deviation	176,422	25,7366	132,549	234,815
Median	6,73617	0,351247	6,08175	7,46101

Fonte: Próprio Autor (2020)

Na Figura 11 são apresentados os gráficos de probabilidade Weibull e log-normal obtidos a partir dos modelos ajustados pelos estimadores de máxima verossimilhança.

Figura 11- Gráficos de probabilidade Weibull e log-normal (dados TBF)

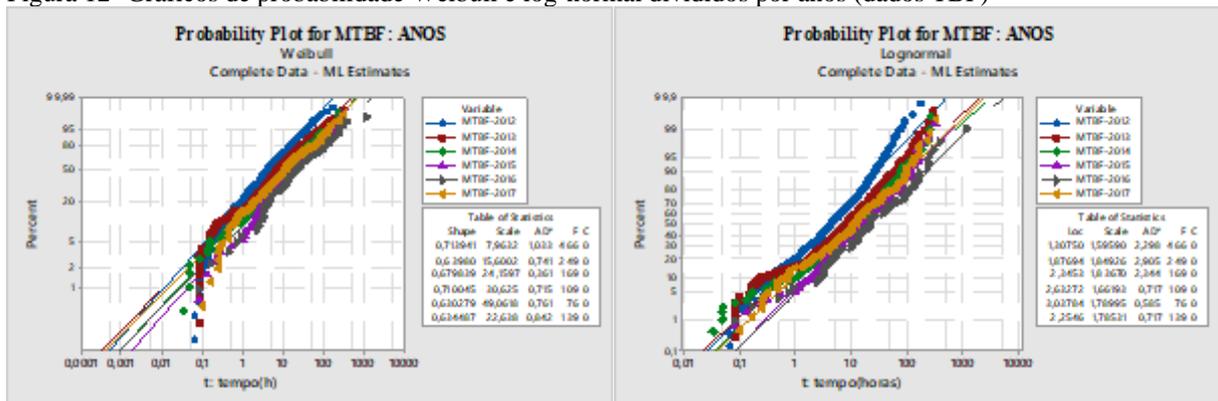


Fonte: Próprio Autor (2020)

Dos gráficos da Figura 11, observa-se que a distribuição log-normal é melhor ajustada pelos dados (pontos mais próximos da reta no gráfico de probabilidade normal).

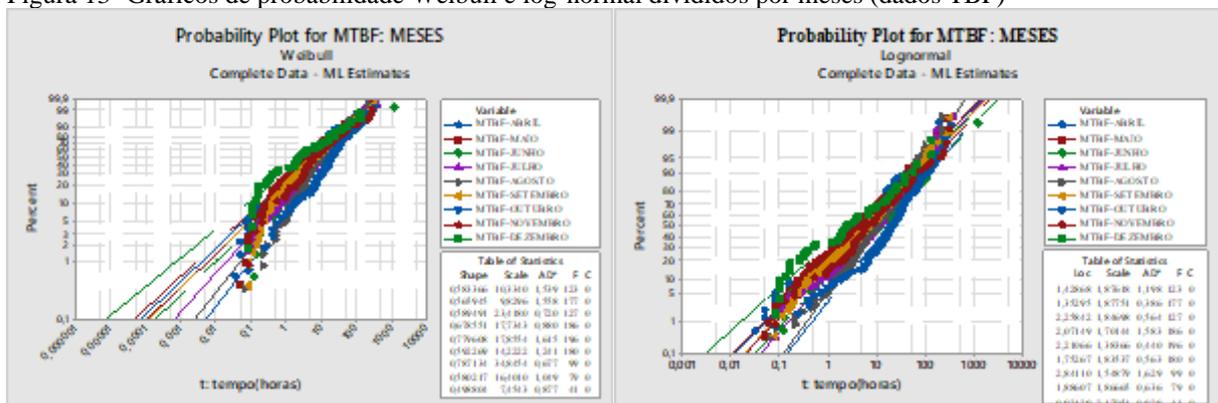
Porém, resultados diferentes são encontrados quando analisamos os dados anual e mensal de acordo com as Figuras 12 e 13, ou seja, pontos mais próximos da reta considerando a distribuição de Weibull.

Figura 12- Gráficos de probabilidade Weibull e log-normal divididos por anos (dados TBF)



Fonte: Próprio Autor (2020)

Figura 13- Gráficos de probabilidade Weibull e log-normal divididos por meses (dados TBF)



Fonte: Próprio Autor (2020)

Assim, assumir a distribuição Weibull para obtenção das curvas de confiabilidade estimadas pelo método de máxima verossimilhança para os tempos entre falhas TBF nos diferentes níveis dos fatores mês e ano reportados no banco de dados; as médias de TBF são apresentados na Tabela 11 e 12 e observa-se que as médias maiores para TBF (tempos entre falhas) nos fatores mês e ano são dados respectivamente por Outubro e 2016.

Tabela 11- EMV para as médias anuais assumindo a distribuição Weibull (TBF) para os Anos, resultados em horas.

Parameter	ANO	Standard		95,0% Normal CI	
		Estimate	Error	Lower	Upper
Mean (TBF)	2012	9,89596	0,649518	8,70141	11,2545
Mean (TBF)	2013	21,6981	2,2014	17,7853	26,4716
Mean (TBF)	2014	31,4734	3,63223	25,1021	39,4619
Mean (TBF)	2015	38,2507	5,23247	29,255	50,0125
Mean (TBF)	2016	69,4404	12,9185	48,2234	99,9924
Mean (TBF)	2017	31,7918	4,35197	24,3105	41,5753

Fonte: Próprio Autor (2020)

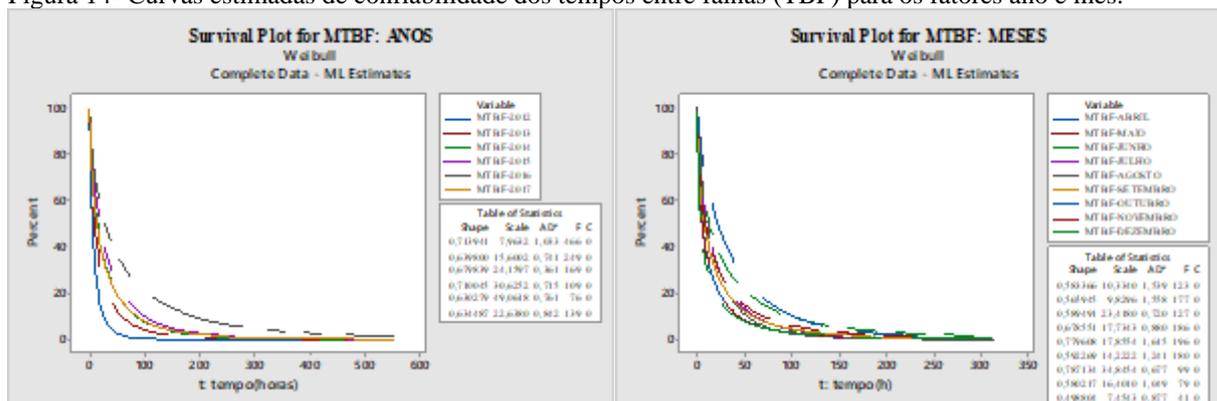
Tabela 12: EMV para as médias mensais assumindo a distribuição Weibull (TBF) para os meses, resultados em horas.

Parameter	Mês	Standard 95,0% Normal CI			
		Estimate	Error	Lower	Upper
Mean (TBF)	Abril	16,145	2,56914	11,8192	22,0541
Mean (TBF)	Maio	16,0316	2,20167	12,2484	20,9833
Mean (TBF)	Junho	36,0693	5,57941	26,636	48,8435
Mean (TBF)	Julho	23,1473	2,54018	18,6676	28,7019
Mean (TBF)	Agosto	20,6186	1,89569	17,2187	24,6899
Mean (TBF)	Setembro	21,7677	2,81974	16,8869	28,0593
Mean (TBF)	Outubro	39,9492	5,13069	31,059	51,384
Mean (TBF)	Novembro	25,8162	5,15853	17,4505	38,1924
Mean (TBF)	Dezembro	14,9748	4,97538	7,80813	28,7192

Fonte: Próprio Autor (2020)

Na Figura 14 são apresentadas as curvas estimadas de confiabilidade dos tempos entre falhas (MTBF) nos diferentes níveis dos fatores ano e mês.

Figura 14- Curvas estimadas de confiabilidade dos tempos entre falhas (TBF) para os fatores ano e mês.



Fonte: Próprio Autor (2020)

6.7 Resultados da análise estatística

Nesta seção será apresentada a análise dos resultados da modelagem dos dados para o tempo de reparo, tempo de falha e a confiabilidade da indústria, sob o enfoque dos estudos de Sellitto (2005, 2007), Mengue e Sellitto (2013) e Komninakis (2017).

Por meio da equação (3.14), a confiabilidade $R(t)$ do modelo Weibull, a confiabilidade da Moenda operar por pelo menos 24 horas é calculada e com o auxílio da equação de percentil de falhas do modelo de Weibull, equação (3.19) pode-se calcular o tempo em que 50% das falhas ocorrem.

A Tabela 13 foi obtida por meio dos resultados das análises estatísticas do banco de dados da empresa, porém os valores em destaque foram obtidos por meio de cálculos. Essa tabela separa os eventos em anos com o objetivo de encontrar um padrão que descrevesse a

forma como os eventos de paradas industriais ocorreram e desta forma verificar se a manutenção praticada pela empresa é a mais recomendada.

Tabela 13- Resultados dos dados ANO (horas)

Parâmetro	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Nº Paradas	467	249	169	109	76	139
Media (log)	-0,608	-0,4916	-0,3984	-0,4773	-0,2903	-0,3374
Desv. Padrao (log)	0,4043	0,4653	0,4499	0,4179	0,4278	0,4095
Forma (Weibull)	0,7139	0,6398	0,6798	0,7100	0,6303	0,6345
Escala (Weibull)	7,9632	15,6002	24,1597	30,6252	49,0618	22,6380
GAMA	3,06	2,06	0,76	0,99	1,26	1,86
MTTR (horas)	0,59	0,68	0,74	0,68	0,82	0,78
MTBF(horas)	15,32	20,89	26,04	33,00	52,31	27,42
Disponibilidade	96,29%	96,84%	97,23%	97,99%	98,46%	97,25%
Confiabilidade t(h)=24	11,10%	26,78%	36,95%	43,13%	52,88%	35,42%
50% das falhas	4,77	8,80	14,09	18,28	27,43	12,70

Fonte: Konminakis (2017) adaptado

Na sequência será analisado os desempenho dos anos e meses com relação aos 7 parâmetros (Fator de Forma, MTTR, MTBF, Disponibilidade, Confiabilidade, Taxa de falha e número de ocorrências).

O ano de 2012 apresenta o tempo médio de reparo de 35,4 minutos (MTTR = 0,59 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 15,32 horas. O parâmetro de forma (γ) igual a 0,7139, assim a taxa de falhas deste ano é decrescente, nesta fase ocorrem falhas prematuras devido a erros nos processos de fabricação, na instalação, aplicação dos materiais dos equipamentos ou até mesmo de operação (MENGUE; SELLITTO, 2013). Na curva da banheira, a indústria está em fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) e desta forma deveria utilizar a estratégia de manutenção adequada para esse período. Para o modelo de Weibull, dado um tempo t qualquer, neste caso 24 horas, tem-se que a confiabilidade do equipamento funcionar ao menos 24 horas é de 11,10% (menor confiabilidade encontrada) e 50% das falhas podem ocorrer em até 4,77 horas. E por último é neste ano foi registrado 467 ocorrências de paradas eventos o que corresponde a 38,63% do total de falhas analisadas no período.

O ano de 2013 apresenta o tempo médio de reparo (MTTR) de 40,8 minutos (0,68 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 20,89h. O Parâmetro de Forma (γ) igual a 0,6398, sendo assim a taxa de falha deste ano é decrescente e todas as falhas características da fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) da curva da banheira estão presentes. Neste ano a moenda esteve disponível para operação em 96,84%. Para um dado tempo t=24h, a confiabilidade da máquina funcionar ao menos 24 horas é de aproximadamente 26,78%, desta forma, existe a probabilidade de 73,22% de a máquina não funcionar até este tempo e aproximadamente 50%

das falhas ocorrerão em 8,80 horas de operação. Neste ano foram registrados 249 eventos de paradas, representando 20,60% do total analisado no período.

O ano de 2014 apresenta o tempo médio de reparo (MTTR) de 44,4 minutos (0,74 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 26,04 horas. O Parâmetro de Forma (γ) igual a 0,6798, sendo assim a taxa de falha deste ano é decrescente e todas as falhas características da fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) da curva da banheira estão presentes. Neste ano a moenda esteve disponível para operação em 97,23%. Para um dado tempo $t=24h$, a confiabilidade da máquina funcionar ao menos 24 horas é de aproximadamente 36,95%, desta forma, existe a probabilidade de 63,05% de a máquina não funcionar até este tempo e aproximadamente 50% das falhas ocorrerão em 14,09 horas de operação. Neste ano foram registrados 169 eventos de paradas, representando 13,98% do total analisado no período.

O ano de 2015 apresenta o tempo médio de reparo (MTTR) de 40,8 minutos (0,68 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 33,00 horas. O Parâmetro de Forma (γ) igual a 0,7100, aproximadamente igual ao ano de 2012, sendo assim a taxa de falha deste ano também é decrescente e todas as falhas características da fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) da curva da banheira estão presentes. Neste ano a moenda esteve disponível para operação em 97,99%. Para um dado tempo $t=24h$, a confiabilidade da máquina funcionar ao menos 24 horas é de aproximadamente 43,13%, desta forma, existe a probabilidade de 56,87% de a máquina não funcionar até este tempo e aproximadamente 50% das falhas ocorrerão em 18,28 horas de operação. Neste ano foram registrados 109 eventos de paradas, representando 9,02% do total analisado no período.

O ano de 2016 apresenta o tempo médio de reparo (MTTR) de 49,2 minutos (0,82 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 52,31 horas. O Parâmetro de Forma (γ) igual a 0,6303, sendo assim a taxa de falha deste ano é decrescente e todas as falhas características da fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) da curva da banheira estão presentes. Neste ano a moenda esteve disponível para operação em 98,46%. Para um dado tempo $t=24h$, a confiabilidade da máquina funcionar ao menos 24 horas é de aproximadamente 52,88%, desta forma, existe a probabilidade de 47,12% de a máquina não funcionar até este tempo e aproximadamente 50% das falhas ocorrerão em 27,43 horas de operação. E por último é importante ressaltar que neste ano foi registrado o menor número de ocorrências com 76 eventos o que corresponde a 6,29% do total de falhas analisadas no período.

E por fim o ano de 2017 apresenta o tempo médio de reparo (MTTR) de 46,8 minutos (0,78 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 27,42 horas. O Parâmetro de Forma

(γ) igual a 0,6345 aproximadamente igual ao ano anterior, sendo assim a taxa de falha deste ano é decrescente e todas as falhas características da fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) da curva da banheira estão presentes. Neste ano a moenda esteve disponível para operação em 97,25%. Para um dado tempo $t=24h$, a confiabilidade da máquina funcionar ao menos 24 horas é de aproximadamente 35,42%, desta forma, existe a probabilidade de 64,58% de a máquina não funcionar até este tempo e aproximadamente 50% das falhas ocorrerão em 12,70 horas de operação. Neste ano foram registrados 139 eventos de paradas, representando 11,50% do total analisado no período.

A Tabela 14 é semelhante a Tabela 13, porém agora os dados foram divididos em meses com o objetivo de encontrar um padrão que descrevesse a forma como os eventos de paradas industriais ocorreram e desta forma verificar se a manutenção praticada pela empresa é a mais recomendada.

Tabela 14- Resultados dos dados mensais (horas).

Parâmetro	Abril	Maió	Jun	Jul	Agos	Set	Out	Nov	Dez
Nº Paradas	123	178	127	186	196	180	99	79	41
Media (log)	-0,507	-0,564	-0,474	-0,490	-0,423	-0,496	-0,516	-0,474	-0,483
Desv. Padrao (log)	0,4327	0,477	0,4384	0,4344	0,3993	0,4639	0,456	0,3964	0,4265
Forma (Weibull)	0,5834	0,5659	0,5895	0,6786	0,7796	0,5923	0,7871	0,5802	0,4988
Escala (Weibull)	10,3340	9,8296	23,4180	17,7343	17,8554	14,2222	34,8454	16,4010	7,4543
GAMA	3,65	4,40	2,35	2,07	2,65	3,53	0,76	2,24	1,16
MTTR (horas)	0,66	0,64	0,69	0,67	0,71	0,68	0,66	0,67	0,68
MTBF(horas)	20,25	22,01	29,74	22,86	23,91	23,71	36,58	22,49	10,93
Disponibilidade	96,84%	97,19%	97,75%	97,14%	97,12%	97,22%	98,22%	97,09%	94,18%
Confiabilidade $t(h)=24$	19,50%	19,07%	36,26%	29,29%	28,38%	25,58%	47,44%	28,73%	16,67%
50% das falhas	5,51	5,14	12,58	10,33	11,16	7,66	21,87	8,72	3,58

Fonte: Próprio Autor (2020)

Não há diferenças significativas entre as médias de TTR entre os meses (valor- $p > 0,05$), por isso os valores de MTTR não serão avaliados.

O mês de Abril apresenta o tempo médio de reparo de 39,6 minutos (MTTR = 0,66 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 20,25 horas. Já o parâmetro de forma (γ) igual a 0,5834, assim a taxa de falhas deste ano é decrescente, nesta fase ocorrem falhas prematuras devido a erros nos processos de fabricação, na instalação, aplicação dos materiais dos equipamentos ou até mesmo de operação (MENGUE; SELLITTO, 2013). Na curva da banheira, a indústria está em fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) e desta forma deveria utilizar a estratégia de manutenção adequada para esse período. Para o modelo de Weibull, dado um tempo t qualquer, neste caso 24 horas, tem-se que a confiabilidade do equipamento funcionar

ao menos 24 horas é de 19,50%, ou seja, existe a probabilidade de 80,50% de a máquina não operar até esse tempo. E 50% das falhas podem ocorrer em até 5,51 horas. E por último neste mês foi registrado 123 eventos o que corresponde a 10,17% do total de falhas analisadas no período.

O mês de Maio apresenta o tempo médio de reparo (MTTR) de 38,4 minutos (0,64 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 22,01 horas. O Parâmetro de Forma (γ) igual a 0,5659, sendo assim a taxa de falha deste ano é decrescente, todas as falhas características da fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) da curva da banheira estão presentes. Neste mês a moenda esteve disponível para operação em 97,19%. Para um dado tempo $t=24h$, a confiabilidade da máquina funcionar ao menos 24 horas é de aproximadamente 19,07%, desta forma, existe a probabilidade de 80,93% de a máquina não funcionar até este tempo e aproximadamente 50% das falhas ocorrerão em 5,14 horas de operação. Neste mês foram registrados 178 eventos de paradas, representando 14,72% do total analisado no período.

O mês de Junho apresenta o tempo médio de reparo (MTTR) de 41,4 minutos (0,69 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 29,74 horas. O Parâmetro de Forma (γ) igual a 0,5895, sendo assim a taxa de falha deste ano é decrescente, todas as falhas características da fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) da curva da banheira estão presentes. Neste mês a moenda esteve disponível para operação em 97,75%. Para um dado tempo $t=24h$, a confiabilidade da máquina funcionar ao menos 24 horas é de aproximadamente 36,26%, desta forma, existe a probabilidade de 63,74% de a máquina não funcionar até este tempo e aproximadamente 50% das falhas ocorrerão em 12,58 horas de operação. Neste mês foram registrados 127 eventos de paradas, representando 10,50% do total analisado no período.

O mês de Julho apresenta o tempo médio de reparo (MTTR) de 40,2 minutos (0,67 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 22,86 horas. O Parâmetro de Forma (γ) igual a 0,6786, sendo assim a taxa de falha deste ano é decrescente, todas as falhas características da fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) da curva da banheira estão presentes. Neste mês a moenda esteve disponível para operação em 97,14%. Para um dado tempo $t=24h$, a confiabilidade da máquina funcionar ao menos 24 horas é de aproximadamente 29,29%, desta forma, existe a probabilidade de 70,71% de a máquina não funcionar até este tempo e aproximadamente 50% das falhas ocorrerão em 10,33 horas de operação. Neste mês foram registrados 186 eventos de paradas, representando 15,38% do total analisado no período.

O mês de Agosto apresenta o tempo médio de reparo (MTTR) de 42,6 minutos (0,71 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 23,91 horas. O Parâmetro de Forma (γ)

igual a 0,7796, sendo assim a taxa de falha deste ano é decrescente, todas as falhas características da fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) da curva da banheira estão presentes. Neste mês a moenda esteve disponível para operação em 97,12%. Para um dado tempo $t=24h$, a confiabilidade da máquina funcionar ao menos 24 horas é de aproximadamente 28,38%, desta forma, existe a probabilidade de 71,62% de a máquina não funcionar até este tempo e aproximadamente 50% das falhas ocorrerão em 11,16 horas de operação. Neste mês foram registrados 196 eventos de paradas, representando 16,21% do total analisado no período.

O mês de Setembro apresenta o tempo médio de reparo (MTTR) de 40,8 minutos (0,68 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 23,71 horas. O Parâmetro de Forma (γ) igual a 0,5923, sendo assim a taxa de falha deste ano é decrescente, todas as falhas características da fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) da curva da banheira estão presentes. Neste mês a moenda esteve disponível para operação em 97,22%. Para um dado tempo $t=24h$, a confiabilidade da máquina funcionar ao menos 24 horas é de aproximadamente 25,58%, desta forma, existe a probabilidade de 74,42% de a máquina não funcionar até este tempo e aproximadamente 50% das falhas ocorrerão em 7,66 horas de operação. Neste mês foram registrados 180 eventos de paradas, representando 14,89% do total analisado no período.

O mês de Outubro apresenta o tempo médio de reparo (MTTR) de 39,6 minutos (0,66 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 36,58 horas. O Parâmetro de Forma (γ) igual a 0,7871, sendo assim a taxa de falha deste ano é decrescente, todas as falhas características da fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) da curva da banheira estão presentes. Neste mês a moenda esteve disponível para operação em 98,22%. Para um dado tempo $t=24h$, a confiabilidade da máquina funcionar ao menos 24 horas é de aproximadamente 47,44%, desta forma, existe a probabilidade de 52,56% de a máquina não funcionar até este tempo e aproximadamente 50% das falhas ocorrerão em 21,87 horas de operação. Neste mês foram registrados 99 eventos de paradas, representando 8,19% do total analisado no período.

O mês de Novembro apresenta o tempo médio de reparo (MTTR) de 40,2 minutos (0,67 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 22,49 horas. O Parâmetro de Forma (γ) igual a 0,5802, sendo assim a taxa de falha deste ano é decrescente, todas as falhas características da fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) da curva da banheira estão presentes. Neste mês a moenda esteve disponível para operação em 97,09%. Para um dado tempo $t=24h$, a confiabilidade da máquina funcionar ao menos 24 horas é de aproximadamente 28,73%, desta forma, existe a probabilidade de 71,27% de a máquina não funcionar até este tempo e

aproximadamente 50% das falhas ocorrerão em 8,72 horas de operação. Neste mês foram registrados 79 eventos de paradas, representando 6,53% do total analisado no período.

O mês de Dezembro apresenta o tempo médio de reparo (MTTR) de 40,8 minutos (0,68 horas). O tempo médio entre falhas (MTBF) igual a 10,93 horas. O Parâmetro de Forma (γ) igual a 0,4988, sendo assim a taxa de falha deste ano é decrescente, todas as falhas características da fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$) da curva da banheira estão presentes. Neste mês a moenda esteve disponível para operação em 94,18%. Para um dado tempo $t=24h$, a confiabilidade da máquina funcionar ao menos 24 horas é de aproximadamente 16,67%, desta forma, existe a probabilidade de 83,33% de a máquina não funcionar até este tempo e aproximadamente 50% das falhas ocorrerão em 3,58 horas de operação. Neste mês foram registrados 41 eventos de paradas, representando 3,39% do total analisado no período.

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção são discutidos os resultados da pesquisa ao longo dos anos e como podem ser utilizados na gestão da manutenção industrial da empresa.

7.1 Comportamento dos indicadores ao longo dos anos

A Figura 15 e 16 apresenta o comportamento dos 7 indicadores de manutenção analisados neste trabalho. Na figura 15 tem-se os 5 indicadores de manutenção da empresa que evoluíram ao longo dos 6 anos. Nos parâmetros MTBF, Disponibilidade, Confiabilidade, Falhas e Número de Ocorrências, é visível a melhora apresentada quando comparamos o primeiro e o último ano analisado.

Na Figura 15 é mostrado o MTBF, observa-se avanços significativos entre os anos de 2012 (15,32 horas) e 2017 (27,42 horas). Isso significa que o tempo médio entre as falhas nesta unidade industrial, obteve uma melhora de 78,9%. De acordo com o gráfico também é possível observar o histórico deste indicador e verificar que durante o período de 2012 a 2016 a evolução foi gradual e atingindo seu valor máximo de 52,31 horas, ou seja, 241% maior que o valor inicial, porém no último ano analisado esse indicador sofreu um retrocesso voltando ao patamar de dois anos anteriores (2014).

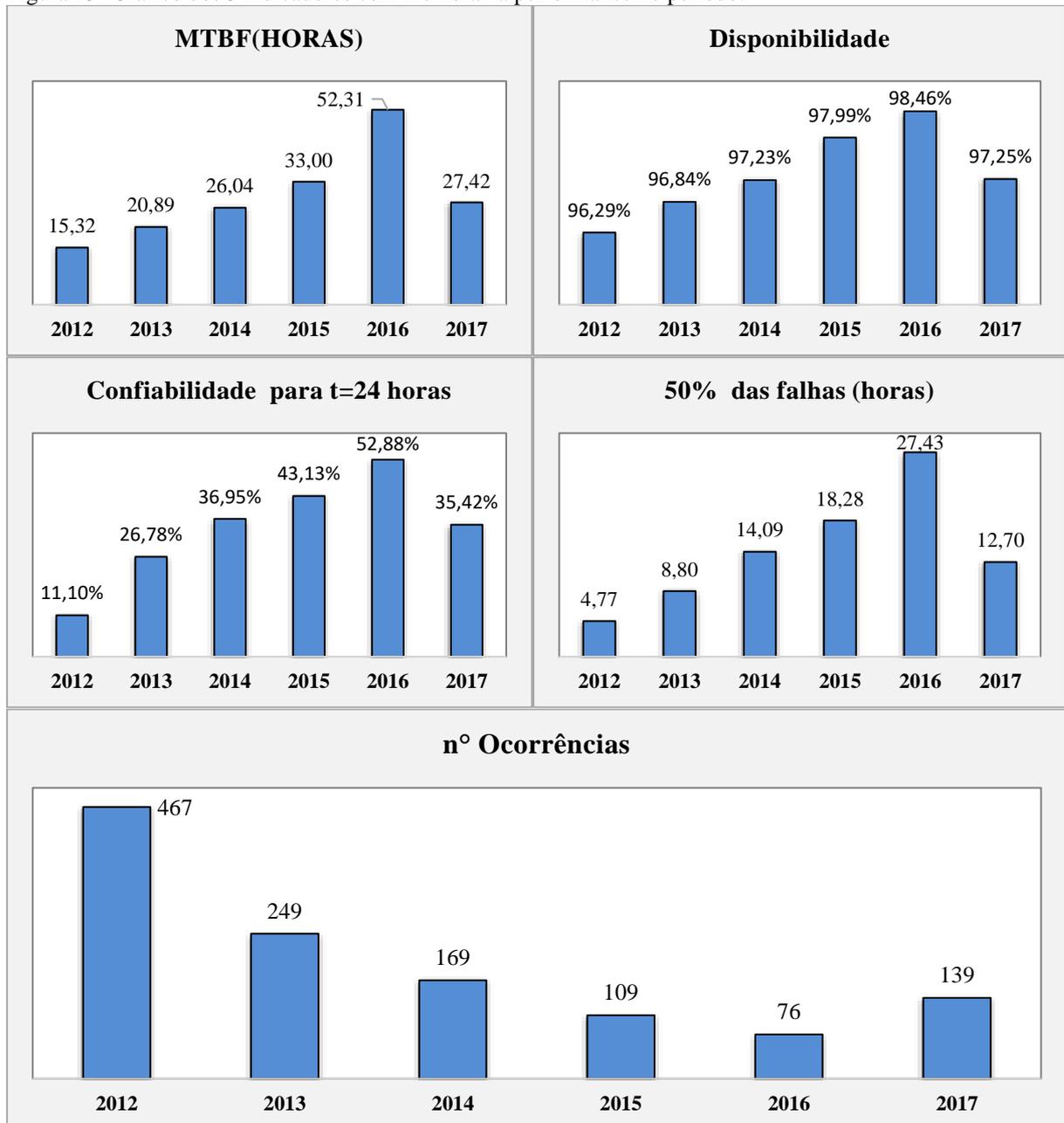
O indicador Disponibilidade da Figura 15, de forma semelhante ao retratado no MTBF apresenta uma evolução gradual e consistente até o ano de 2016, ano o qual atinge seu maior patamar 98,46%, porém no último ano analisado também ocorre um retrocesso ficando próximo ao patamar de anos anteriores. Ao analisar o histórico do período houve uma melhora ao sair de 96,29% no primeiro ano para 97,25% no último.

O gráfico da Confiabilidade da unidade industrial na Figura 15, retrata a confiabilidade dos equipamentos funcionarem por pelo menos 24 horas. Pode-se observar neste gráfico o mesmo comportamento já retrato nos gráficos anteriores, onde há uma evolução gradual até o ano de 2016, quando é apresentado o melhor indicador do período (52,88%) e a queda no ano seguinte (35,42%), originando um retrocesso ao patamar de 3 anos anteriores.

No gráfico que representado o tempo em que 50% das falhas ocorrem, o comportamento continua semelhando aos já apresentados. Vale ressaltar que em valores relativos, a evolução deste indicador quando comparamos o ano de 2012 (4,77) com o de melhor desempenho que

foi o ano de 2016 (27,43) temos um crescimento de 475%, já comparando a evolução do período completo temos uma evolução de 166%.

Figura 15- Gráfico dos 5 indicadores com melhora na performance no período.

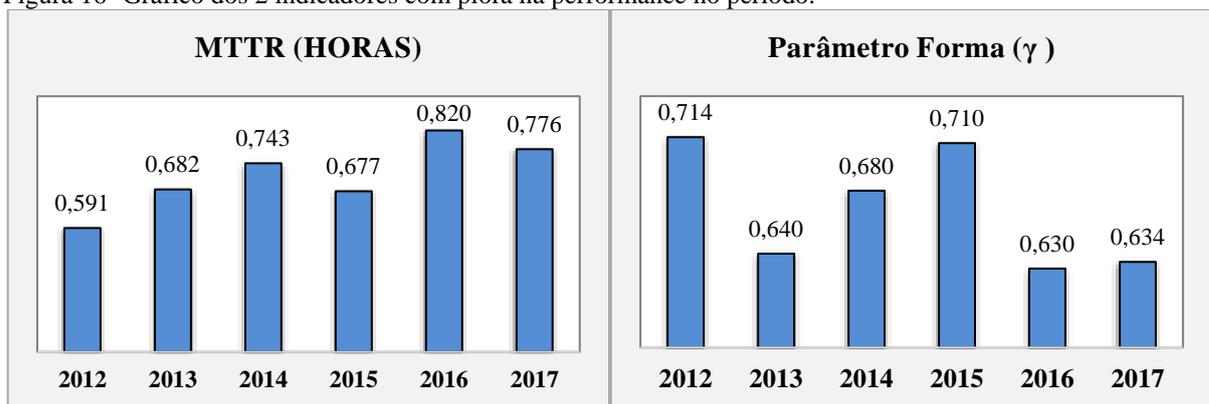


Fonte: Próprio Autor (2020)

A partir da Figura 15 observa-se que é nítido a redução do número de ocorrências de paradas do equipamento durante os 6 anos. E da mesma forma que nos demais o melhor indicador ocorre em 2016 com 79 eventos de paradas e um aumento no número de eventos no ano seguinte. Este aumento está diretamente relacionado a piora do desempenho dos indicadores anteriores.

Diferente dos indicadores acima já apresentados, os quais houve uma melhora ao longo do tempo, nos dois próximos MTTR e Fator de forma (γ) houve pioras substanciais. A Figura 16 apresenta a performance do MTTR durante o período, de forma antagônica aos 5 parâmetros citados anteriormente, houve uma inversão entre os anos de pior e melhor indicadores, sendo o ano de 2016 o ano de pior desempenho com 0,820 horas (49,2min) e o ano de 2012 o melhor desempenho com 0,591 horas (35,46 min).

Figura 16- Gráfico dos 2 indicadores com piora na performance no período.



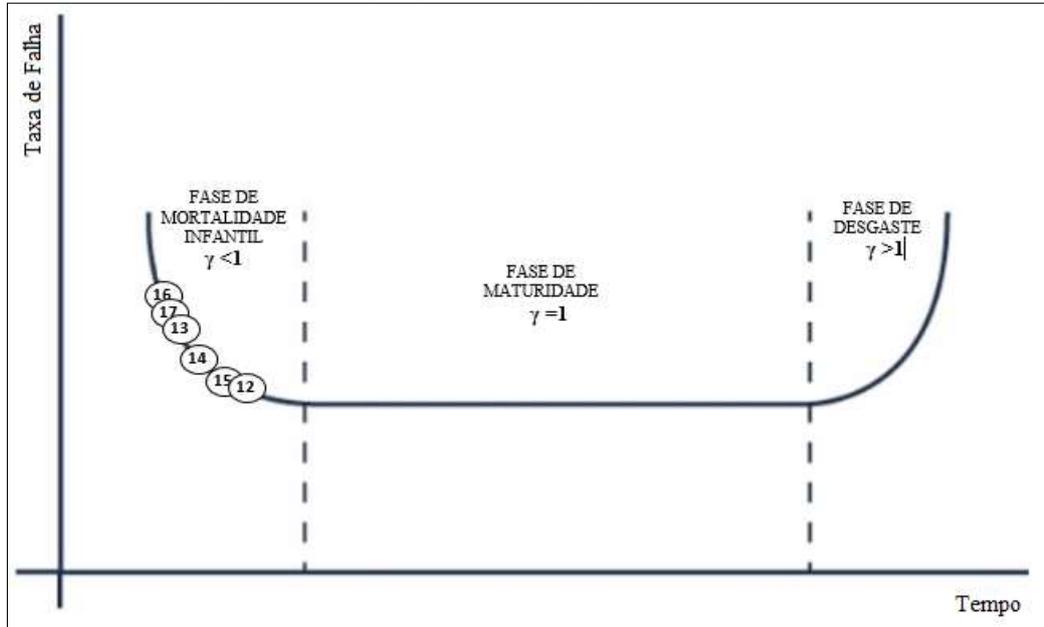
Fonte: Próprio Autor (2020)

Para cada ano analisado é possível observar que $\gamma < 1$, desta forma em todo o período fase de mortalidade infantil prevaleceu. Os resultados do gráfico acima também não apresentaram um padrão ou uma tendência de melhora com o parâmetro de forma (γ) se aproximando de 1 (fase de maturidade). Apenas quando se compara os anos consecutivos de 2013, 2014 e 2015, houve uma evolução gradual e uma queda abrupta no ano de 2016 e uma leve melhora no ano seguinte.

Na figura 17 temos a representação da curva da banheira, o qual mostra a provável posição do equipamento ao longo de seu ciclo de vida, no gráfico cada circunferência faz referencia a um ano dentro do período analisado neste trabalho.

Na região de mortalidade infantil ocorrem falhas prematuras devido a erros nos processos de fabricação, na instalação ou na aplicação dos materiais dos equipamentos (MENGUE; SELLITTO, 2013). Para Sellitto (2005), a estratégia de manutenção indicada para esta fase do ciclo de vida é a manutenção corretiva, pois identifica e corrige as falhas na origem do problema, pois buscaria a causa raiz dos possíveis defeitos e os eliminaria da operação.

Figura 17- Curva da banheira representando a posição da manutenção entre 2012 a 2017.



Fonte: Próprio Autor (2020)

7.2 Discussão dos resultados (Ano)

Com base nos resultados pode-se destacar como anos opostos 2012 e 2016. O primeiro por ser destaque negativo, em 5 dos 7 indicadores e o segundo por ser destaque positivo em 5 dos 7 indicadores analisados. O ano de 2015 de forma geral foi mais consistente em seus resultados, já os anos de 2013 e 2014 podem ser considerados anos de evolução da manutenção para o níveis superiores, alcançado nos anos seguintes em 2015 e 2016. E por fim 2017 pode ser entendido como um retrocesso, pois houve quedas expressivas nos valores dos indicadores analisados e retorno ao patamar de 3 anos anteriores.

No ano de 2012 foi obtido o menor tempo médio entre falhas, 15,32 horas, a menor disponibilidade operacional 96,29%, a menor confiabilidade 11,10% (para um tempo $t=24$ horas), o menor tempo onde 50% das falhas ocorrem (4,77 horas) e por fim, foi o ano que apresentou o maior número de falhas 467, sendo 38,63% do período. De forma positiva o ano, apresentou o menor tempo médio de reparo 35,4 minutos (0,59 horas). Com relação ao parâmetro de forma, foi o ano que esteve mais próximo a 1 ($\gamma = 0,714$). De acordo com Mengue e Sellitto (2013), quando $\gamma \approx 1$ o equipamento está em transição, ou seja, caminhando ao longo

da curva da banheira em direção a fase de maturidade, isso é um indicativo do sucesso das ações de manutenção implementadas.

O segundo ano analisado 2016, como descrito anteriormente é o destaque positivo por ter o melhor desempenho em 5 dos 7 indicadores analisados, como o Tempo médio entre falhas de 52,31 horas, a Disponibilidade operacional de 98,46, a Confiabilidade de 52,88% (para um tempo $t=24$ horas), o tempo onde 50% das falhas ocorrem foi de 27,43 horas e o número de falhas de 76, o que representa apenas 6,29% do total analisado. Em contrapartida também obteve os piores desempenhos com relação aos indicadores MTTR e o fator de forma (γ), o Tempo médio de reparo foi de 49,2 minutos (0,82 horas) e o fator de forma mais distante de 1 ($\gamma=630$).

O próximo ano analisado é 2015 um ano equilibrado e o mais coerente em relação aos indicadores, pois manteve-se em segundo lugar em desempenho em todos os indicadores analisados. O Tempo médio entre falhas foi de 33 horas, o tempo médio de reparo foi de 42,6 minutos (0,677 horas), a Disponibilidade operacional foi de 97,99%, a Confiabilidade foi de 43,1% (para um tempo $t=24$ horas), o tempo onde 50% das falhas ocorrem esteve em 18,28 horas e por fim o número de falhas foi de 109 (9,02% do total). Em conformidade com os resultados acima o valor do fator de forma foi maior que a maioria do período $\gamma=0,710$ e próximo a 1, o que evidencia a migração da fase de mortalidade infantil para a maturidade.

Os anos de 2013 e 2014, precisam ser analisados com conjunto. Pois houve uma sensível melhora e evolução gradual em todos os indicadores, exceto o MTTR. De forma respectiva temos os seguintes resultados nestes anos, o Tempo médio entre falhas foi de 20,89 e 26,035 horas, a Disponibilidade operacional foi de 96,84% e 97,23%, a Confiabilidade foi de 26,8% e 37,0% (para um tempo $t=24$ horas), o tempo onde 50% das falhas ocorrem esteve em 8,797 e 14,091 horas. O número de falha no período foi reduzido em 32,12% saiu de 249 em 2013 para 169 em 2014. Na análise do fator de forma (γ) também é possível evidenciar a melhoria do indicador, pois os valores foram aproximando de $\gamma=1$, quando em 2013 era de 0,640 e 2014 foi para 0,680.

Após todo processo de evolução ao longo do período, em 2017 houve quedas expressivas e significantes em quase todos os indicadores com retorno ao patamar de performance de 2014, porém diferente daquela época, a qual foi considerada como uma evolução, 2017 é considerado um retrocesso, por não manter os avanços conquistados. Os parâmetros com piora na performance foram: o Tempo médio entre falhas foi de 27,42 horas, a Disponibilidade operacional foi de 97,25%, a Confiabilidade foi de 35,4% (para um tempo $t=$

24 horas), o tempo onde 50% das falhas ocorrem esteve em 12,70 horas e o número de falhas deste ano foi de 139 (11,5% do total). No fator de forma (γ) houve uma leve melhoria, neste ano o resultado foi de 0,634, um aumento de 0,004 frente ao ano anterior. O Tempo médio de reparo foi de 46,56 min (0,776 horas), uma sensível melhoria em relação ao ano anterior.

7.3 Comportamento dos Indicadores ao longo dos meses

A Figura 18 e 19 apresenta o comportamento de 6 indicadores: MTBF, Disponibilidade, Confiabilidade, Taxa de falha, Parâmetro de Forma e Número de Paradas. O MTTR não será analisado, pois de acordo com a análise ANOVA o p-value $>0,05$ faz com que não exista diferenças desse entre os meses.

Os parâmetros MTBF, Disponibilidade, Confiabilidade e Taxa de falhas possuem comportamentos semelhantes e de acordo com o gráfico 17 é possível verificar que nos primeiros dois meses de safra ocorre uma leve evolução dos indicadores. Em junho é alcançado o segundo melhor desempenho do ano, após isso é sucedido por uma queda e leve oscilação nos próximos 3 meses seguintes. No mês de outubro é alcançado a melhor performance com queda substancial em novembro e até então, em dezembro tem-se os menores patamares. De forma macro também é possível identificar que no período de dois meses de início (abril e maio) e de fim (novembro e dezembro) da safra os indicadores ficam nos seus menores patamares.

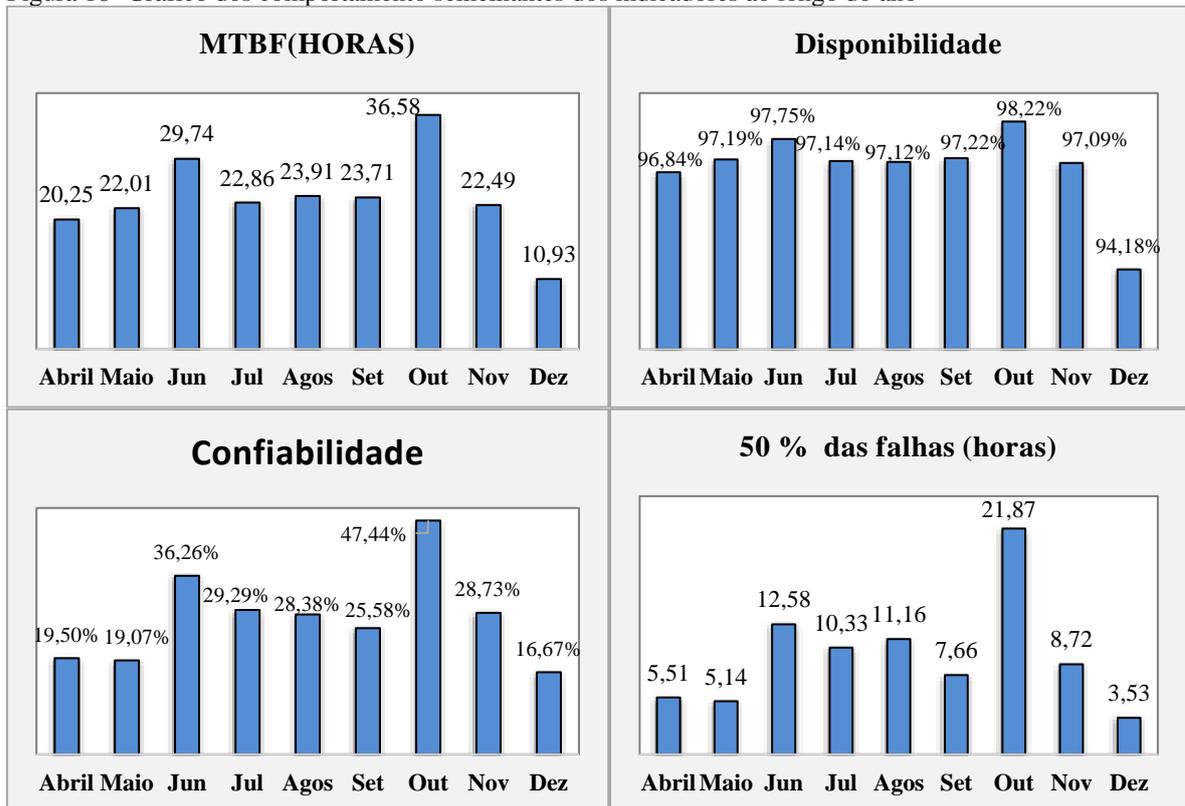
O MTBF da figura 18 apresenta bons desempenhos nos meses de junho (29,74 horas) e outubro (36,58 horas). Com exceção do baixo desempenho do mês de dezembro (10,93 horas) os demais meses ficam entre 20,25 horas do mês de abril e 23,91 horas do mês de agosto.

A Disponibilidade da figura 18 o melhor resultado foi outubro com 98,22% seguido de junho com 97,75%. Com exceção ao mês de dezembro com 94,18% e abril com 96,84% os demais ficaram acima do valor recomendado pela companhia que é de 97%

O gráfico da Confiabilidade da unidade industrial na figura acima, retrata a confiabilidade dos equipamentos funcionarem por pelo menos 24 horas. Nos meses de outubro e junho temos os dois melhores resultados com 47,44% e 36,26% respectivamente. A particularidade deste gráfico é a visível diferença de melhor desempenho dos meses de julho a setembro com relação aos meses de início e fim de safra.

Ainda na figura 18 o tempo em que 50% das falhas ocorrem, pode-se observar que o mês de junho, apesar de ainda continuar ser o segundo melhor com 12,58 horas já não é tão diferente dos demais, porém outubro continua com a melhor performance 21,87%.

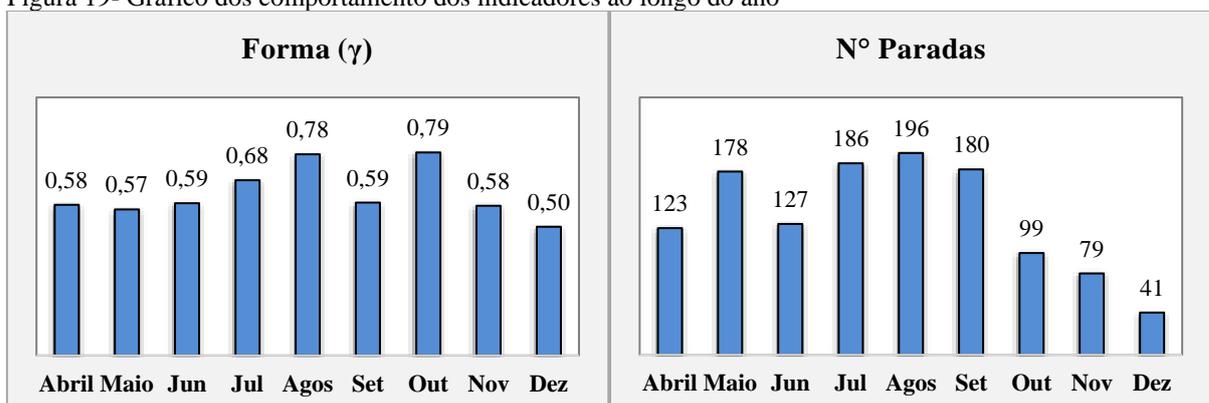
Figura 18- Gráfico dos comportamento semelhantes dos indicadores ao longo do ano



Fonte: Próprio Autor (2020)

Na Figura 19 é mostrado a performance do parâmetro de Forma (γ) e do número de paradas, neste dois indicadores não é possível identificar qualquer semelhança entre eles ou com os demais anteriormente analisados, por isso serão estudados separados.

Figura 19- Gráfico dos comportamento dos indicadores ao longo do ano



Fonte: Próprio Autor (2020)

Para o parâmetro de Forma (γ) é possível observar que $\gamma < 1$ para todos os meses, desta forma em todo o período a fase de mortalidade infantil prevaleceu. Os meses de agosto e outubro de forma isolada foram os que mais se aproximaram de 1 (fase de maturidade), porém sempre precedido de quedas perceptíveis. Também não há evidências de melhoras ao longo do período ou semelhança com o ciclo de vida convencional (mortalidade-maturidade e desgaste).

7.4 Discussão dos resultados (Mês)

Com a análise gráfica é possível identificar 3 tipos de comportamentos ao longo dos meses, os quais podem ser classificados e analisados de forma conjunta, pois o desempenho dos indicadores são semelhantes. A Figura 20 identifica os comportamentos ao longo dos meses.

Figura 20- Comportamentos das falhas ao longo do ano.

INÍCIO SAFRA:	ABRIL	MAIO	JUNHO
MEIO SAFRA:	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO
FINAL SAFRA:	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
	Comportamento	Resultados	
	1	Ruim	
	2	Razoável	
	3	Bom	

Fonte: Próprio Autor (2020)

O primeiro é referente aos meses de início e final de safra, o segundo é relacionado aos dois meses de melhor performance e o terceiro é associado aos meses de meio de safra.

Comportamento 1

No início da safra, principalmente abril e maio, de acordo com o histórico dos profissionais do setor e da usina, ocorre as maiores oscilações de processos como partida de

início de safra da unidade industrial, rampa de moagem (processo de preparação gradual para atingir a operação plena da planta industrial) falhas no aquecimentos de equipamentos a vapor, ajustes pontuais de processos, problemas em regulagem de equipamentos. Também é importante salientar que nos meses anteriores (entressafra), a indústria estava parada e dedicada exclusivamente na manutenção preventiva de entressafra. Em abril e maio, de acordo com a literatura tem-se a fase de mortalidade infantil com $\gamma < 1$, isso realmente ocorre na prática e é confirmado pelos valores de γ do período, abril $\gamma = 0,58$ e maio $\gamma = 0,57$. O MTBF de abril é de 20,25 horas e de maio 22,01 horas e a Confiabilidade de operação para um tempo de 24 horas ser de 19,50% e 19,07% respectivamente, ou seja para esses meses a probabilidade de a planta operar por 24 horas sem interrupção é menos de 20%, em linha com os resultados anteriores, o tempo em que 50% das falhas ocorrem é de 5,51 horas para abril e 5,14 para maio. A Disponibilidade apresenta evolução no período, pois sai do valor de 96,84% para 97,19% o que é reflexo da melhoria da estabilidade da operação. O número de paradas de abril ser menor que do mês seguinte é consequência da variabilidade do dia de início de safra, em 2012 dia 18/05, em 2013 dia 17/04, 2014 dia 08/04, 2015 dia 27/04, 2016 dia 01/04 e 2017 dia 04/04, ou seja a média de números de dias de operação de abril para os demais é menor.

Nos meses de final de safra, novembro e dezembro de acordo com o histórico do setor e profissionais da usina, ocorrem falhas constantes por desgastes e quebras dos equipamentos devido a operação contínua e intensiva durante todo o período de safra e acentuado pelas chuvas da estação, as quais aumentam a quantidade de impurezas minerais vindos junto com matéria prima (cana de açúcar) e aumento o número de paradas e retornos da planta industrial, pois neste momento o setor agrícola da companhia não consegue colher e transportar a cana de açúcar que está no campo. Quando isso ocorre a indústria tem a possibilidade de atuar de maneira preventiva, substituindo e reparando todos os itens detectados com defeitos.

De acordo com a literatura tem-se a fase de desgaste $\gamma > 1$, porém a análise mantém o parâmetro de forma $\gamma < 1$, novembro com 0,58 e dezembro com 0,50, neste caso o período do ciclo de vida está na mortalidade infantil. Todos os indicadores variam de modo expressivos, o MTBF em novembro é de 22,49 horas e de dezembro é de 10,93 horas, o mesmo ocorre com a Confiabilidade de operação para o tempo de 24 horas ser de 28,73% para o primeiro e 16,67% para o segundo, Novembro tem Disponibilidade 97,09% e Dezembro 94,18%. O motivo de Dezembro possuir o menor Número de Paradas é em razão do dia do término da safra, em 2012 foi dia 14/12, em 2013 foi dia 10/12, 2014 foi dia 15/11, 2015 foi dia 21/11 e 2017 foi dia 15/10, ou seja a média de números de dias de operação de dezembro é menor que dos anteriores.

Comportamento 2

O Comportamento 2 é exclusivo dos meses de meio de safra quando a unidade industrial está em operação nominal e sofre pouca influência de fatores externos como chuvas e impurezas vindas junto com a cana de açúcar, também são os meses com os resultados de menores amplitudes. De acordo com a literatura tem-se a fase de maturidade ($\gamma \approx 1$) e as interrupções por ajuste de processo ou desgaste não deveriam ocorrer, mas os resultados apontam para a mortalidade infantil com $\gamma < 1$, ainda sim é o período com maior média do parâmetro de forma e com resultado máximo de 0,78, um valor bem próximo ao da fase de maturidade do ciclo de vida, coincidindo com a altura atual da safra. O MTBF mínimo e máximo do período são respectivamente 22,86 e 23,91 horas uma diferença de pouco mais de uma hora, muito inferior a oscilação dos demais períodos, os quais podem chegar a mais de 25 horas quando comparados a Outubro e Dezembro. A Confiabilidade, Disponibilidade e a taxa de falhas variam 3,71%, 0,1% e 3,5 horas respectivamente o que comprova que o comportamento equilibrado em relação aos outros períodos, mas também evidencia resultados razoáveis. De acordo com os profissionais da unidade, nestes meses a dificuldade de realizar manutenções é enorme, por causa dos longos períodos de estiagens (sem chuvas) e porque a indústria não pode parar, pois haveria paralização de uma extensa cadeia de produção e logística que vai desde o corte da cana no campo ao recebimento dela na indústria. Desta forma a manutenção praticada é a preditiva, por meio do monitoramento dos equipamentos críticos e a corretiva emergencial.

Comportamento 3

Junho e Outubro, apesar de afastados cronologicamente, possuem comportamentos semelhantes e resultados que destoam de forma significativa em relação aos demais meses. Outubro possui o melhor desempenho em MTBF, Disponibilidade, Confiabilidade, Taxa de Falhas, e Parâmetro de forma, seguido por Junho que exceto para o Parâmetro de forma, o qual teve resultado semelhante aos meses de piores desempenhos ($\gamma=0,59$).

Após os ajustes de início de safra, está posicionado Junho que auferiu os resultados dos ajustes e reparos dos meses anteriores, os quais foram conturbados e repletos de regulagens, falhas e oscilações do processo. Desta forma, com os problemas operacionais corrigidos e os equipamentos distantes da fase de desgaste a performance do mês é considerada boa.

O resultado mês de outubro é reflexo das manutenções por oportunidades, que é quando a indústria está parada por motivos agrícolas (chuvas) e pode atuar com a manutenção

preventiva de toda a sua planta. Mas também é quando começam a aparecer os sintomas dos desgastes dos equipamentos, por causa a utilização intensa e o excesso de impurezas minerais que os equipamentos estão sujeitos durante a operação ocasionando consequências irreparáveis para os próximos meses.

8 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi verificar por meio do uso das funções da Confiabilidade se estratégia de manutenção adotada por uma Usina de Cana-de-açúcar era o mais adequado para o gerenciamento da sua manutenção. Para isso fez-se necessário a definição da posição global da unidade industrial no ciclo de vida da curva da banheira. O método de pesquisa adotado apoiou-se na modelagem estatística mediante ao emprego da análise de confiabilidade aos dados dos tempos de reparo (TTR) e tempo entre falhas (TBF).

É importante ressaltar que esse trabalho limitou-se a analisar dados históricos de paradas por manutenção de origem industrial, não considerando condições climáticas como chuvas, problemas agrícola como falta de cana ou administrativos e seus efeitos ou consequências nas tomadas de decisões ou resultados da manutenção industrial. O trabalho também não analisou os efeitos ou impactos de possíveis alterações nas questões financeiras, verbas disponíveis para manutenção e reduções de pessoas dedicados a operação ou manutenção.

Os dados foram originados do histórico de paradas registrado e disponível para consulta no software de gestão da empresa estudada. A qualidade e quantidade de informações contidas nesse banco de dados foi de fundamental importância para o desenvolvimento deste estudo. Isso tudo possibilitou análises assertivas e detalhadas com resultados confiáveis que podem auxiliar os gestores da manutenção a tomar decisões melhores, com mais rapidez e assim proporcionar mais competitividade para a empresa por meio da melhoria da manutenção.

A análise estatística dos dados foram feitas com auxílio do software Minitab[®] versão 16, o qual é dotado de ferramentas para modelagem de dados de confiabilidade. As distribuições de probabilidade dos modelos de Log-normal e Weibull, descreveram de forma satisfatória os dados dos tempo de reparo (TTR) e tempos entre falhas (TBF) para todas as informações de parada de moenda, a qual interrompe a linha de produção da unidade industrial.

Após análise dos dados dos tempos entre falhas (TBF) através do modelo de Weibull foi possível identificar que, em todos os períodos analisados, a indústria estava em fase de mortalidade infantil ($\gamma < 1$), no entanto também pode ser identificados períodos relativamente próximos a fase de maturidade ($\gamma \approx 1$) como os anos de 2012 ($\gamma=0,714$), 2015 ($\gamma=0,710$) e o agregado os meses de Agosto ($\gamma=0,78$) e Outubro ($\gamma=0,79$) dos 6 anos de safra. Ainda assim, esses valores são pontuais e junto dos os demais não apresentam um padrão de comportamento

que possa ser relacionado com uma possível melhora, ou seja, com uma tendência $\gamma \cong 1$, que representa a fase de maturidade no ciclo de vida.

O Quadro 3 apresenta um comparativo entre as práticas de manutenções recomendadas para Mortalidade infantil de acordo com Sellitto (2005) e a praticada pela empresa.

Quadro 3- Estratégia de manutenção do ciclo de vida de mortalidade infantil e o praticado pela empresa.

Fase	Estratégia	Decorrência	Recomendado	Empresa
Mortalidade infantil, falhas de origem $\gamma < 1$	Emergência	Retarda ou até impede o fim da mortalidade infantil ao não reforçar os itens que quebraram ou não remover as causas das falhas de origem.	Sim	Sim
	Corretiva	Antecipa o fim da mortalidade infantil ao reforçar os itens que quebraram ou remover as causas das falhas de origem.	Sim	Sim
	Preditiva	Monitora as falhas em progresso que podem resultar em quebra, mas estas são muito poucas nesta fase, pois as quebras se dão mais por baixa resistência.	Não	Sim
	Preventiva	Perpetua ou até agrava a mortalidade infantil ao trocar exatamente os sobreviventes, os itens fortes, que não têm falhas de origem.	Não	Sim

Fonte: Adaptado (SELLITTO, 2005)

Mediante os resultados obtidos e a identificação da posição da manutenção na curva da banheira, fica notório que a estratégia de manutenção adotada durante todo o período não é a mais adequada, porque utiliza de forma intensa a manutenção preventiva e a aplica de forma aleatória as demais estratégias sem critérios técnicos pré-estabelecidos. Para Mengue e Sellitto (2013), na região de $\gamma < 1$, ocorrem falhas prematuras devido a erros nos processos de fabricação, na instalação ou na aplicação dos materiais dos equipamentos. Sellitto (2005) recomenda para a fase de mortalidade infantil a manutenção corretiva, dado que esse tipo de manutenção procura as causas reais dos possíveis defeitos de projeto, de fabricação, de instalação ou de operação e as eliminaria de forma a não se repetir novamente.

Porém, de forma já consagrada o setor sucroalcooleiro, assim como a empresa analisada, possui a prática de apoiar suas decisões nas experiências dos funcionários e no histórico de quebras e com isso utiliza de forma intensa a manutenção preventiva durante a entressafra, por meio da substituição massiva de itens estáticos e rotativos (elétricos e mecânicos). Já na safra, existe uma combinação de diversos tipos como a preventiva por oportunidade, corretiva planejada, corretiva emergencial e preditiva.

Desta forma a empresa se equivocou na estratégia, pois utilizou um mix de combinações de diferentes formas de manutenções ao invés de identificar primeiramente em que fase do ciclo de vida estava sua manutenção. Pois como citado no quadro acima a prática da manutenção

preventiva perpetua e até agrava a mortalidade, pois substitui os sobreviventes da safra anterior, ao invés de prevenir a quebra como era o esperado. E as falhas em progresso que podem ser monitoradas pela preditiva são poucas nesta fase.

Entretanto, para os gestores da época fica notório que houve uma evolução substancial da manutenção, apesar dos resultados do fator de parâmetro mostrarem ao contrário. Isso fica evidente por meio da análise dos demais indicadores, pois a melhoria realmente aconteceu e a explicação é que nos primeiros anos analisados neste trabalho a gestão da manutenção era rudimentar e no decorrer dos anos houve um avanço em virtude da implantação de novos métodos e práticas, os quais agregaram conhecimento e contribuíram para a construção de melhores resultados, porém se mostraram-se exauridos ao seu limite, o qual para ser transpassado é necessário a implantação de uma gestão moderna, mais técnica e eficiente.

Contudo que foi analisado e discutido neste estudo espera-se que os resultados possam contribuir com futuras pesquisas e incentivo para o aprimoramento das técnicas de confiabilidade para o setor, já que a confiabilidade mostrou-se ser uma poderosa ferramenta para auxiliar os gestores de manutenção nas decisão de escolha da estratégia mais adequada para os equipamentos

8.1 Trabalhos futuros

O foco deste trabalho foi analisar de forma anual e mensal todas as ocorrências que interrompessem a operação de moagem da cana de açúcar, por meio da paralização da moenda. Como trabalho futuro, seria interessante um estudo de confiabilidade dedicado aos modos de falhas dos equipamentos que mais tiveram impacto na suspensão do processo e desta forma entender como essas falhas ocorrem.

Uma outra oportunidade seria ampliar essa análise para mais usinas de cana de açúcar como forma de comparação entre as linhas de moagem e as estratégias de manutenções utilizadas.

Além disso analisar os impactos da manutenção preditiva de hibernação na conservação dos ativos de uma usina durante o período de entressafra, procurando reduzir custos de manutenção e substituição inapropriada de peças sobreviventes da safra anterior.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R.B.; CARVALHO, A. L.. Análise sistêmica de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade em uma frota de tratores de esteira: projeto piloto aplicado a mineração. In ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 36, 2016, João pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2016. [PB.]
- ALSYOUF, I. Maintenance practices in Swedish industries: Survey results. **International Journal of Production Economics**, v. 121, n. 1, p. 212-223, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724** – Informação e documentação. Trabalhos acadêmicos - Apresentação. Rio de Janeiro, dez 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023** – Informação e documentação. Referências. Elaboração. Rio de Janeiro, ago. 2002b.
- AZIZ, A., AHMED, S., KHAN, F., STACK, C., LIND, A. Operational risk assessment model for marine vessels. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 185, p. 348-361, 2019.
- BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M.; GABBRIELLI, R. Monte Carlo simulation approach for a modified FMECA in a power plant. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 16, n. 4, p. 313-324, 2000.
- BERTO, R. M. V. S.; NAKANO, D. Revisitando a produção científica nos anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Production**, v. 24, n. 1, p. 225-232, 2014.
- BRAND, G.G. **Método de apoio à formulação de estratégia de manutenção em ambiente industrial: um estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Vale dos Sinos. 113 p., São Leopoldo, 2011.
- BRAUER, D.C.; BRAUER, G.D. Reliability-centered maintenance. **IEEE Transactions on reliability**, v. 36, n. 1, p. 17-24, 1987.
- CARRETERO J., GARCIA F., PEREZ M, PENA J. M., PEREZ J. M., COTAINA N. “**Study of existing reliability centered maintenance (RCM)—approaches used in different industries.**” Informe Tecnico, 2000, Facultadde Informatica, UPM.
- CARRETERO, J.; PEREZ, J.M.; GARCIA-CARBALLEIRA, F.; CALDERON, A.; FERNADEZ, J. GARCIA, J.D.; LOZANO, A.; CARDONA, L.; COTAINA, N.; PRETE, P. Applying RCM in large scale systems: a case study with railway networks. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 82, n. 3, p. 257-273, 2003.
- CARVALHO, M. T. B. **Análise e avaliação de períodos de inspeção em sistemas de natureza tecnológica**. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial e de Sistemas) – Universidade do Minho – Escola de Engenharia. 267 p., Guimarães, Portugal, 2012.
- CERVEIRA, D.; SELBITTO, M. A.. Manutenção centrada em confiabilidade (MCC): análise quantitativa de um forno elétrico a indução. **Revista Produção Online**, v. 15, n. 2, p. 405-432, 2015.

- CHOPRA, A.; SACHDEVA, A.; BHARDWAJ, A.. Productivity enhancement using reliability centred maintenance in process industry. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, v. 23, n. 2, p. 155-165, 2016
- DESHPANDE, V. S.; MODAK, J. P. Application of RCM to a medium scale industry. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 77, n1, p. 31-43, 2002;
- DIAS, A. **Confiabilidade na manutenção industrial**, 2010.
<http://docplayer.com.br/3238650-Confiabilidade-na-manutencao-industrial.html> -acessado 18/10/2018
- ELSAYED, E.A. **Reliability engineering**. Massachusetts: Addison Wesley, 1996.
- FACHIN, O.; **Fundamentos de Metodologias**. 3ª. ed, São Paulo, Saraiva, 2001.
- FARRERO, J. C.; TARRÉS, L. G.; LOSILLA, C. B. Optimization of replacement stocks using a maintenance programme derived from reliability studies of production systems. **Industrial Management & Data Systems**, v. 102, n. 4, p. 188-196, 2002.
- FERNANDES, S. M.; **Planejamento e controle da produção em usina sucroalcooleira**. 2009. 191 P. Dissertação (Mestre em engenharia de produção). UNIP, SÃO PAULO 2009.
- FITCH. E.C. Proactive Maintenance for Mechanical System. Amsterdam: **Elsevier**, 1992. 339p.
- FOGLIATTO, F.S.; RIBEIRO, J. L. D.; **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- GANDHARE, B. S.; AKARTE, M. M.; PATIL, P. P. Maintenance performance measurement—a case of the sugar industry. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 24, n. 1, p. 79-100, 2018.
- GARVIN, D. A. (1988). **Managing Quality: The strategic and competitive edge**. Siman and Schuster 1988.
- GIOLO, S. R.; COLOSIMO, E. A. **Análise de sobrevivência aplicada**. Edgard Blucher, 2006.
- HALPERN, S. **The assurance sciences. An introduction to quality control and reliability**. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1978.
- HAMEED, Z.; VATN, J.; HEGGSET, J. Challenges in the reliability and maintainability data collection for offshore wind turbines. **Renewable Energy**, v. 36, n. 8, p. 2154-2165, 2011.
- HEO, J. H.; KIM, M. K.; LYU, J. K. Implementation of reliability-centered maintenance for transmission components using particle swarm optimization. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 55, p. 238-245, 2014.
- HIPKIN, I. B.; DE COCK, C. TQM and BPR: lessons for maintenance management. **Omega**, v. 28, n. 3, p. 277-292, 2000.

HOLMBERG, K.. Competitive reliability 1996–2000. Technology Programme Report, v.5, 2001. Final Report, National Technology Agency, Helsinki, 2001.

FEDERAÇÃO EUROPEIA DAS SOCIEDADES NACIONAIS DE MANUTENÇÃO (EFNMS) <http://www.efnms.eu/about-us/what-does-efnms-stand-for/>, acessado em 08/07/2018 as 15:00h

DICIONÁRIO HOUAISS disponível em <https://houaiss.uol.com.br/pub/apps/www/v3-3/html/index.php#1>, acessado em 10/07/2018 as 23:34h

KARDEC, A.; NASCIF, J. Manutenção: Função Estratégica, 3ª Edição, Rio de Janeiro. **Qualitymark, Petrobras**, 2009.

KECECIOGLU, D. **Reliability Engineering Handbook**, Volume 1. DEStech Publications, 2002a.

KOMNINAKIS, D.. **Análise de confiabilidade para formulação de estratégia de manutenção de equipamentos em uma empresa da indústria alimentícia**. 2017. 96 p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção) UNIARA, Araraquara 2017.

KOMNINAKIS, D.; PIRATELLI, C. L.; ACHCAR, J. A. Análise de confiabilidade para formulação de estratégia de manutenção de equipamentos em uma empresa da indústria alimentícia. **Revista Produção Online**, v. 18, n. 2, p. 560-592, 2018

KLUTKE, G.A.; KIESSLER, P.C.; WORTMAN, M.A. A critical look at the bathtub curve. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 52, n. 1, 2003.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade, Mantenabilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitmark, 2001.

LAWLESS, J. F.; **Statistical models and methods for lifetime data**, Wiley series in probability and mathematical statistics, Wiley & Sons, 1982.

LEWIS, E.E. **Introduction to Reliability Engineering**. John Wiley & Sons, 1994.

MARCONI, M.A., LAKATOS, E.M. **Fundamentos de metodologia científica**. Atlas, 1985.

MENDES, A. A. **Manutenção centrada em confiabilidade: uma abordagem quantitativa**. 2011. 85 p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção). Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2011

MENDES, A. A.; RIBEIRO, J. L. D.. Estabelecimento de um plano de manutenção baseado em análises quantitativas no contexto da mcc em um cenário de produção JIT. **Revista Produção**, Porto Alegre, v. 24, n. 3, p. 675-686, 2014.

MENGUE, D. C.; SELLITTO, M. A. Estratégia de manutenção baseada em funções de confiabilidade para uma bomba centrífuga petrolífera. **Revista Produção Online**, v.13, n. 2, p. 759-783, 2013.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Revista Produção**, v. 17, n. 1, p. 216-229, 2007.

MIRSHAWKA, V.; OLMEDO, N.L. Manutenção - Combate aos Custos da Não-Eficácia-A vez do Brasil. São Paulo; **Makron Books**, 1993.

MOBLEY, R. Keith. **An introduction to predictive maintenance**. Elsevier, 2002.

MOLINA, G. B.; DUARTE FILHO, M.; ALMEIDA, L. L. P.; SOUZA, G. F.; COSTA, I. J. S.. A Manutenção Centrada na Confiabilidade como proposta de aprimoramento dos planos de manutenção aplicados a uma máquina extrusora. In: XXIV SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2017, Bauru. **Anais...** Bauru 2017 [SP].

MOREIRA NETO, L. S.; TAVARES, D. M. L.. Aplicabilidade da mcc em uma empresa de mineração. In ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 35, 2015, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2015. [CE.]

MOUBRAY, J. **Reliability-Centered Maintenance**. **Industrial Press**. New York, 1997.

MOURA JUNIOR, E. C.; BARBOSA JUNIOR, I. O.; MILHOMEM, D. A.; PORTO, M. L.; BEZERRA, R. R. R.. Proposta de um modelo sistemático de planejamento da manutenção para empresa que não possua sistema integrado de manutenção. In ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 36, 2016, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2016. [PB].

NBR, A. B. N. T. 5462-TB116: Confiabilidade e manutenibilidade. **Rio de Janeiro**, 1994.

OTANI, M.; MACHADO, W. V.. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Revista Gestão Industrial**, v. 4, n. 2, p. 1-16, 2008.

RAPOSO, C. F. C.. Overall Equipment Effectiveness: aplicação em uma empresa do setor de bebidas do polo industrial de Manaus. **Revista Produção Online**, v. 11, n. 3, p. 648-667, 2011.

RAUSAND, M. Reliability centered maintenance. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 60, n. 2, p. 121-132, 1998.

RUSCHEL, E.; SANTOS, E. A. P.; LOURES, E. F. R.. Industrial maintenance decision-making: A systematic literature review. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 45, p. 180-194, 2017.

SABOUHI, H.; ABBASPOUR, A.; FOTUHI-FIRUZABAD, M.; DEGHANIAN, P.. Reliability modeling and availability analysis of combined cycle power plants. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 79, p. 108-119, 2016.

SANTOS, W. B.; COLOSIMO, E. A.; MOTTA, S. B. Tempo ótimo entre manutenções preventivas para sistemas sujeitos a mais de um tipo de evento aleatório. **Revista Gestão e Produção**, v. 14, n. 1, p. 193-202, 2007

SCHUINA, P. A. V.; IZIDORO, F. S.; RORIZ, J. P. G.; SCHUINA, R. D.; LOPES, C. B.. Aplicação da manutenção centrada em confiabilidade para desenvolvimento de um plano de

manutenção para sensores de nível ótico (overfill) em uma transportadora de combustíveis. In: Encontro Nacional De Engenharia de Produção, 34, 2014, Curitiba. **Anais...**Curitiba,2014. [PR.]

SCHWAN, C. A.; HILL, E. S.; MIDGETT, W. D.; **Reliability Centered Maintenance (RCM) Technical Reference for Substations**, Electric Power Research Institute, California (1996).

SELLITTO, M. A. Análise estratégica da manutenção de uma linha de fabricação metal-mecânica baseada em cálculos de confiabilidade de equipamentos. **Revista GEPROS**, n. 2, p. Pag. 97, 2007.

SELLITTO, M. A. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Production**, v. 15, n. 1, p. 44-59, 2005.

SELLITTO, M.; BORCHARDT, M.; ARAÚJO, D. Manutenção centrada em confiabilidade: aplicando uma abordagem quantitativa. **Anais do XXII ENEGEP, ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. Curitiba: ABEPRO, 2002.

SELVIK, J. T.; AVEN, Terje. A framework for reliability and risk centered maintenance. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 96, n. 2, p. 324-331, 2011.

SILVA, E. L. da; MENEZES, E. M. Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação. 4 ed. Florianopolis: **Editora UFSC**, 2005

SMITH, A. M., 1993. Reliability Centered Maintenance. McGraw-Hill, **New York** (1993).

SOUZA, A. L. B.; SANTOS, J. S.; SILVA, J. C.; BRAGA, D.; TAVARES NETO; J. I. H.. Gestão da manutenção no setor de produção de açúcar em uma indústria sucroalcooleira. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 38, 2018, Maceió. Anais... Maceió. [AL.]

SOUZA, S. S.; LIMA, C. R. C.. Manutenção Centrada em Confiabilidade como ferramenta estratégica. In ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 23, 2003, Ouro Preto. **Anais...** Minas Gerais, 2015. [MG.]

SRIKRISHNA, S.; YADAVA, G. S.; RAO, P. N. Reliability-centred maintenance applied to power plant auxiliaries. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 1996.

TATSCH, D.M. **Metodologia da manutenção centrada na confiabilidade aplicada em uma máquina de montar pneus**. 2010. 31 p. Monografia (Graduação de Engenharia Mecânica).Escola de Engenharia. UFRG; Porto Alegre, 2010.

VACCARO, G.L.R. **Modelagem e análise da confiabilidade de sistemas**. Dissertação (Mestrado Em Engenharia De Produção). Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. 222 p.Rio Grande Do Sul, 1997.

VAZ, J.C. **Manutenção de sistemas produtivos: um estudo sobre a gestão da disponibilidade de equipamentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 203 p. São Paulo, 2003.

VIANA, H. R. G.; PCM-Planejamento e controle da manutenção. **Qualitymark Editora LTDA**, 2002.

VISHNU, C. R.; REGIKUMAR, V. Reliability based maintenance strategy selection in process plants: a case study. **Procedia technology**, v. 25, p. 1080-1087, 2016.

WAEYENBERGH, G.; PINTELON, L.. CIBOCOF: a framework for industrial maintenance concept development. **International Journal of Production Economics**, v. 121, n. 2, p. 633-640, 2009.

WEIBULL, W. A. A statistical distribution function of wide applicability. **Journal of Applied Mechanics**, 1951,18, 292–297.

WILMETH, R. G.; USREY, M. W. Reliability-centered maintenance: A case study. **Engineering Management Journal**, v. 12, n. 4, p. 25-31, 2000.

WIREMAN, T.; **Developing Performance Indicators for Managing Maintenance**. New York: Industrial Press, Inc., 1998.

XENOS, H. G.; **Gerenciamento da Manutenção Produtiva**. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1998.