

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

ADAN MARCEL DA SILVA

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E  
DISPONIBILIDADE DE MOINHOS DE UMA PLANTA INDUSTRIAL**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

Curitiba  
2015

ADAN MARCEL DA SILVA

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E  
DISPONIBILIDADE DE MOINHOS DE UMA PLANTA INDUSTRIAL**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues

Curitiba  
2015

# ANÁLISE DA CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E DISPONIBILIDADE DE MOINHOS DE UMA PLANTA INDUSTRIAL

**ADAN MARCEL DA SILVA**

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado no dia 07 de março de 2015, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso de Especialização  
em Engenharia da Confiabilidade

Banca Examinadora:

---

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.  
UTFPR

---

Prof. Carlos Henrique Mariano Dr.  
UTFPR

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.  
UTFPR

## RESUMO

SILVA, Adan Marcel da. **ANÁLISE DA CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E DISPONIBILIDADE DE MOINHOS DE UMA PLANTA INDUSTRIAL**. Monografia do Curso de Especialização em Engenharia da Confiabilidade do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Este trabalho apresenta a aplicação dos conceitos de confiabilidade e manutenibilidade como ferramentas importantes para a escolha de políticas de manutenção adequadas para moinhos de uma planta industrial. O método de estudo contempla a revisão dos conceitos de confiabilidade, de manutenibilidade e de disponibilidade de equipamentos, a delimitação do sistema e do período a ser estudado, o levantamento dos dados por meio dos registros documentais a cada ocorrência de falha ou a cada parada programada para manutenção. Foram considerados dados referentes ao período de abril/2014 a setembro/2014. A modelagem estatística dos dados foi feita para estimar o tempo médio entre falha e de reparo dos equipamentos (e dos componentes que apresentaram maior incidência de falhas), onde, a partir destes, foi possível estimar a disponibilidade dos mesmos. A aplicação do método permitiu identificar a ocorrência de falhas nos equipamentos e nos componentes mais críticos e sua localização na curva da banheira, o que serviu de base para as propostas de políticas de manutenção.

**Palavras-chave:** Confiabilidade. Manutenibilidade. Disponibilidade. Plano de manutenção.

## ABSTRACT

SILVA, Adan Marcel da. **RELIABILITY, MAINTAINABILITY AND AVAILABILITY ANALYSIS OF MILLS INDUSTRIAL PLANT**. Monograph of Specialization in Reliability Engineering of Academic Department of Electrical Engineering at Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2015.

This work presents the application of reliability studies and maintainability as important tools for the selection of appropriate maintenance policies for mill of an industrial plant. The study method includes revision of reliability concepts, maintainability and availability of equipment, the definition of the system and the period being studied, the data collection through the documentary record every occurrence of failure or every shut down for maintenance. Data were considered for the period from April/2014 to September/2014. Statistical modeling of the data was performed to estimate the mean time between failure and repair of equipment (and the components that a higher incidence of failures), where, from there, it was possible to estimate the availability. The application of the method identified the occurrence of equipment failure and the most critical components and its location in the bath-tub curve, which formed the basis for the proposed maintenance policies.

**Key Words:** Reliability. Maintainability. Availability. Maintenance plan.

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Interpretação dos parâmetros da distribuição de Weibull .....	6
Tabela 2 – MTTR estimado pelo modelo Lognormal .....	13
Tabela 3 – MTBF estimado pelo modelo de Weibull .....	14
Tabela 4 – Disponibilidade observada .....	16
Tabela 5 – Ajuste e estimativa dos parâmetros dos modelos.....	17
Tabela 6 – Estimativas de parâmetros .....	18

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva da banheira.....	9
Figura 2 – Forma das funções de densidade $f_T(t)$ , de distribuição acumulada $F_T(t)$ , de confiabilidade $R(t)$ e de taxa de falha $h(t)$ .....	15
Figura 3 – Confiabilidade estimada por Kaplan-Meier .....	16
Figura 4 – Forma das funções de densidade $f_T(t)$ , de distribuição acumulada $F_T(t)$ , de confiabilidade $R(t)$ e de taxa de falha $h(t)$ para a válvula rotativa .....	19
Figura 5 – Forma das funções de densidade $f_T(t)$ , de distribuição acumulada $F_T(t)$ , de confiabilidade $R(t)$ e de taxa de falha $h(t)$ para o hedler.....	20

## LISTA DE SIGLAS, acrônimos e Abreviaturas

SIGLA	DESCRIÇÃO
ABRAMAN	Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos
MTBF	Mean Time Between Failures - Tempo Médio Entre Falhas
MTTF	Mean Time To Failure - Tempo Médio Para Falhar
MTTR	Mean Time To Repair - Tempo Médio de Reparo
PDF	Probability Density Function - Função Densidade de Probabilidade



**LISTA DE SIMBOLOS**

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
$\beta$	Beta – Parâmetro de forma da distribuição de Weibull
$\eta$	Eta – Vida característica da distribuição de Weibull
$\gamma$	Vida mínima da distribuição de Weibull
$h(t)$	Função de risco
$\Lambda(t)$	Função de risco acumulado

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	TEMA .....	1
1.1.1	Delimitação do Tema.....	1
1.2	OBJETIVO GERAL.....	2
1.2.1	Objetivos Específicos .....	2
1.3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	2
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	3
<b>2</b>	<b>CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E DISPONIBILIDADE .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>TAXA DE FALHA COMO FERRAMENTA DO PLANO DE MANUTENÇÃO .</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>22</b>
6.1	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	22
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>24</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o tema, o problema, os objetivos e as justificativas que orientaram o desenvolvimento deste trabalho.

### 1.1 TEMA

A busca pela melhora na capacidade do sistema de produção nas indústrias é muito comum. O grande desafio é a obtenção de resultados satisfatórios em indicadores como produtividade, disponibilidade e confiabilidade, que estão diretamente relacionados às políticas de manutenção dos ativos (CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO, 2011).

Dessa forma o tratamento das falhas se torna importante para a melhora da capacidade do processo produtivo de equipamentos e pode proporcionar um bom desempenho com baixo índice de falhas (LAFRAIA, 2001).

#### 1.1.1 Delimitação do Tema

O presente trabalho é aplicado em uma planta industrial de instalação de moagem de materiais.

O foco principal será o de analisar e propor políticas de manutenção adequadas que otimizem a capacidade de produção de moinhos desta planta industrial.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é aplicar técnicas da Engenharia da Confiabilidade para propor políticas de manutenção adequadas que otimizem a capacidade de produção de moinhos de uma planta industrial.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

- i) Analisar a confiabilidade, a manutenibilidade e a disponibilidade das máquinas por mês;
- ii) Identificar os componentes que mais falharam no período;
- iii) Aplicar ferramentas de teorias de decisão a fim de propor políticas de manutenção adequadas.

## 1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A coleta dos dados foi por meio de formulários preenchidos por especialistas de manutenção a cada ocorrência de falha ou a cada parada programada para manutenção e são referentes ao período de abril/2014 a setembro/2014.

O método de estudo foi: revisão dos conceitos de confiabilidade, de manutenibilidade e de disponibilidade de equipamentos e sistemas; delimitação do sistema e do período a ser estudado; levantamento histórico dos dados por meio dos registros documentais de falha e do tempo até o reparo do sistema; análise dos dados de falha por meio da modelagem estatística; estudo do tempo médio até a falha (MTBF); modelagem do tempo médio de reparo (MTTR); estimativa da disponibilidade do sistema; identificação dos componentes mais críticos; análise estatística dos mesmos e por fim; a utilização dos resultados para propor uma política de manutenção para tais componentes.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo um apresenta uma introdução ao estudo delimitando a abrangência do mesmo, além de apresentar de forma sucinta o tema, os objetivos, a justificativa e procedimentos que serão adotados.

O Capítulo 2 e 3 são apresentados os conceitos teóricos do estudo aplicados na análise estatística dos dados e que fundamentam os resultados do presente trabalho.

No Capítulo 4 é apresentada toda a metodologia utilizada.

Na Seção 5 são apresentados os resultados dos estudos e, por fim, na Seção 6 se encontram as considerações finais baseada nos resultados e nas discussões apresentadas.

## 2 CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E DISPONIBILIDADE

A confiabilidade está relacionada à confiança que se tem no equipamento em relação ao seu desempenho funcional e o tempo em que ficará em operação (LAFRAIA, 2001). Por meio da quantificação da confiabilidade (em termos de probabilidade) é possível precaver-se em relação ao surgimento de possíveis falhas (LAFRAIA, 2001).

A falha é caracterizada quando o equipamento deixa de desempenhar sua função requerida e, quanto mais falhas o equipamento apresentar, menor será a confiabilidade do equipamento (KARDEC; NASCIF, 2001).

Kardec e Nascif (2001, p. 96) apresentam uma definição clara para confiabilidade, embora na literatura possam ser encontradas outras definições semelhantes: “Confiabilidade é a probabilidade que um item possa desempenhar sua função requerida, por um intervalo de tempo estabelecido, sob condições definidas de uso”.

Uma maneira de descrever os dados de confiabilidade é por meio de funções do tempo de falha. Seja  $T$  uma variável aleatória que represente o tempo de falha. A expressão matemática da confiabilidade,  $R(t)$ , está descrita em (1). A probabilidade de falha até o tempo  $t$  é dada por  $F(t)$ , que é a função distribuição acumulada de  $R(t)$ , e está expressa pela equação (2) (FAGUNDES et al., 2011).

$$R(t) = P[T \geq t], \quad t > 0 \quad (1)$$

$$F(t) = 1 - R(t), \quad t > 0 \quad (2)$$

Segundo Wuttke, a função densidade de probabilidade (pdf) é definida pelo limite da probabilidade da falha ocorrer no intervalo de tempo  $[t, \Delta t)$  por unidade de tempo, e sua equação está definida em (3).

A função de risco  $h(t)$ , expressa em (4), é definida como o limite da probabilidade de um equipamento falhar em um intervalo curto de tempo,  $[t, \Delta t)$ , dado que este não tenha falhado até o tempo  $t$ . Esta função corresponde a uma

taxa de falha instantânea que indica como o risco muda ao longo do tempo. A função de risco acumulado  $\Lambda(t)$ , expressa pela equação (5), fornece o risco de ocorrência até um determinado tempo  $t$  (WUTTKE, 2008).

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t)}{\Delta t}, \quad t > 0 \quad (3)$$

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t}, \quad t > 0 \quad (4)$$

$$\Lambda(t) = \int_0^t h(t) dt, \quad t > 0 \quad (5)$$

Algumas distribuições de probabilidade podem ser ajustadas para explicar o comportamento de vida de um equipamento. As distribuições mais utilizadas, segundo Fagundes et al., são: Normal, Exponencial, Lognormal, Weibull e Gamma. A distribuição de Weibull, expressa em (6), é muito utilizada em estudos na área da Confiabilidade. Ela pode ser utilizada mesmo em amostras pequenas e pode apresentar mais de uma forma característica, o que demonstra grande flexibilidade do modelo devido ao parâmetro de forma  $\beta$  (SANTOS, 1996).

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{(\beta-1)} e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta}, \quad t \geq 0 \quad (6)$$

onde  $\beta$  é o parâmetro de forma do modelo,  $\gamma$  representa a vida mínima e  $\eta$  é o parâmetro de vida característica.

Por meio dos parâmetros da distribuição é possível dar uma interpretação física para o problema e então, propor soluções efetivas para diminuição e/ou controle da falha (DODSON; NOLAN, 2002).

A Tabela 1 apresenta a interpretação dos parâmetros.

Tabela 1 - Interpretação dos parâmetros da distribuição de Weibull.

$\gamma$	$\beta$	Interpretação
0	Não há confiabilidade intrínseca. Significa que as falhas podem ocorrer a partir de $(t + \Delta t)$ , para $\Delta t > 0$ .	
	< 1	Taxa de falha decrescente, possivelmente devido a: baixos coeficientes de segurança na carga, coeficientes de segurança especificados de maneira incorreta, erros de projeto, instalação inadequada, entre outros.
	1	Taxa de falha constante, falhas de origens aleatórias.
	> 1	Taxa de falha crescente, desgaste iniciando logo que o componente entra em serviço.
> 0	Há período de garantia, durante o qual não ocorre falha. O componente possui confiabilidade intrínseca.	
	< 1	Desgaste do tipo fadiga ou similar.
	$\approx 0,5$	Fadiga de baixo ciclo.
	$\approx 0,8$	Fadiga de alto ciclo.
	> 1	Desgaste do tipo erosão.
< 0	Há vida de prateleira, o componente pode falhar antes de ser usado.	
	< 1	Desgaste do tipo fadiga, iniciando antes do componente entrar em serviço.
	> 1	Desgaste devido a contínua redução da resistência.

Fonte: Adaptado de Lafraia (2001, p. 39)

As demais distribuições de probabilidade não serão abordadas, mas podem ser consultadas em Lafraia (2001, p. 25).

Após a escolha do modelo de probabilidade apropriado é possível estimar os parâmetros da distribuição e fazer suas interpretações práticas para o problema, como exemplificadas anteriormente para a distribuição de Weibull.



Além dos parâmetros do modelo é possível calcular estatísticas como o MTBF e MTTR, descritas em (7) e (8), que são de fundamental importância na gestão da manutenção e quantificam a frequência média que as falhas estão ocorrendo e o tempo de reparo esperado para manutenção do equipamento, respectivamente (WUTTKE, 2008).

$$MTBF = E[T] = \int_0^{\infty} t f(t) dt, \quad t \geq 0 \quad (7)$$

$$MTTR = E[T] = \int_0^{\infty} t g(t) dt, \quad t \geq 0 \quad (8)$$

onde  $f(t)$  e  $g(t)$  são a função densidade do tempo até a falha e do tempo até o reparo, respectivamente.

Os procedimentos utilizados no estudo da falha do equipamento podem ser empregados para estudar a cerca do reparo do mesmo, pois estão relacionadas à mesma variável aleatória: o tempo. Dessa forma dá-se origem aos estudos de manutenibilidade (FAGUNDES *et al.*, 2011).

A manutenibilidade é definida pela Norma Brasileira Registrada (NBR) 5642, (1994) como: “Capacidade de um item ser mantido ou recolocado no estado no qual pode executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos”.

O propósito de se estudar a manutenibilidade de equipamentos é o de reduzir o tempo em que este se encontra fora de operação. Dessa forma, a melhoria da manutenibilidade deve ser alvo de todos os setores da organização, pois atinge diretamente o sistema de produção (KARDEC; NASCIF, 2001).

Além da confiabilidade e da manutenibilidade – índices de referência na gestão da manutenção – é possível calcular também, a partir destes dois, a probabilidade do equipamento estar disponível para produção em determinado tempo, a denominada disponibilidade, que está expressa em (9) (IRESON; COOMBS; MOSS, 1996).

$$D \cong \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (9)$$

Na sequência será abordada a importância da função taxa de falha e como esta pode contribuir na detecção da vida útil de um equipamento.

### 3 A TAXA DE FALHA COMO FERRAMENTA PARA UM PLANO DE MANUTENÇÃO

A função taxa de falha fornece informações importantes a respeito da vida de um equipamento. Sua representação gráfica pode ser feita por meio da curva da banheira, mostrada na Figura 1.

A curva da banheira pode explicar o comportamento de vida de componentes elétricos, mecânicos e sistemas, o que comprova sua importância e grande aplicabilidade em estudos na área da Engenharia da Confiabilidade (KARDEC; NASCIF, 2001).

Esta curva apresenta três períodos que fazem parte da vida característica de um equipamento: a mortalidade infantil, a vida útil e o envelhecimento (degradação).

Considerando o ajuste do modelo de Weibull a fase da vida pode ser associada ao parâmetro  $\beta$  do modelo (MOUBRAY, 2000).

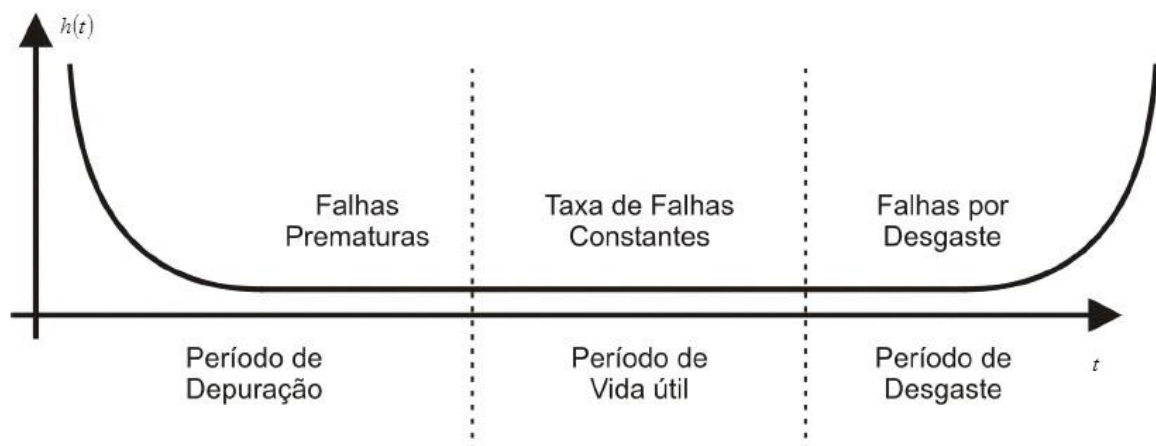


Figura 1 – Curva da banheira  
Fonte: Lafraia (2001, p. 16)

Na mortalidade infantil há grande probabilidade de ocorrer uma falha, porém esta é decrescente com o decorrer do tempo, devido à correção dos erros de projeto ou o reparo dos componentes mais frágeis (FAGUNDES *et al.*, 2011).

No período de vida útil a ocorrência da falha é relativamente constante e consideravelmente menor do que a observada no período inicial. Lafraia (2001, p. 16) comenta que nesta etapa as falhas ocorrem por fatores menos controláveis, tornando assim, as falhas mais aleatórias, o que dificulta sua previsão.

Na etapa de envelhecimento ou degradação a taxa de falha é crescente devido ao desgaste natural do equipamento, o que representa o final de sua vida útil. A taxa de falha será cada vez maior à medida que o tempo passa (KARDEC; NASCIF, 2001).

## 4 METODOLOGIA

Quanto à natureza dessa pesquisa, é classificada como pesquisa aplicada, explicativa e com uma abordagem quantitativa do problema. O objeto de estudo é composto por equipamentos de produção que executam a mesma função: moagem de materiais para indústria do cimento.

O problema a ser solucionado é a parada constante dos equipamentos devido ao grande número de falhas observadas, o que afeta diretamente o sistema de produção. Deseja-se diminuir o tempo de parada dos equipamentos. Para tanto, foram aplicadas as técnicas de Análise de Dados de Vida (Life Data Analysis – LDA), pois esta permite estudar separadamente os dados de falha e os dados de reparo.

Este tipo de análise é importante e bastante utilizada na solução de problemas, porém existem outras técnicas que poderiam ser utilizadas como, por exemplo, a análise completa de sistemas reparáveis, – que leva em consideração o estudo do MTBF e MTTR simultaneamente – pois permite fazer o estudo de simulações. Poderiam ser utilizados também os modelos de crescimento da confiabilidade, pois analisam a evolução dos MTBF's utilizando como base o processo estocástico não homogêneo de Poisson.

A coleta e organização dos dados são administradas por profissionais da manutenção via sistema e foram coletados dados referentes ao período de abril de 2014 a setembro de 2014.

Inicialmente o estudo foi conduzido considerando o equipamento como um todo (sistema) e posteriormente a análise foi feita nos componentes que mais apresentaram incidência de falhas no período: a válvula rotativa e o hedler. A classificação desses componentes como os mais críticos foi por meio de uma análise mais detalhada no banco de dados, onde apontou que 77,8% das falhas ou paradas programadas para manutenção estiveram relacionadas com algum desses componentes, isto é, os demais componentes pouco influenciaram na parada do sistema.

Foi observado também que 84,1% e 66,9% das causas da falha na válvula rotativa e no hedler, respectivamente, estão relacionados com o acúmulo de resíduos no interior do componente e materiais presos em sua estrutura.

Por meio dos tempos inicial e final de reparo calculou-se o tempo de parada do equipamento e o tempo total de operação. Os tempos acumulados de reparo dos equipamentos foram utilizados para estimar o MTTR geral e por mês (separadamente).

Verificou-se que a distribuição Lognormal se ajustou aos dados de reparo e a estimativa do MTTR mensal e geral está apresentada na Tabela 2, com seus respectivos intervalos de confiança.

De forma análoga, foi executado o mesmo procedimento para organização dos dados de falha, onde o ajuste e a estimativa do MTBF se deram por meio da distribuição de Weibull, como apresentado na Tabela 3.

A disponibilidade foi calculada a partir de (9) e os valores estão apresentados na Tabela 4. Posteriormente, considerando as mesmas análises para os componentes mais críticos (válvula rotativa e hedler) foi ajustado o modelo Lognormal para os dados de reparo e o modelo de Weibull para os dados de falha dos dois componentes.

A estimativa dos parâmetros dos modelos para cada componente estão descritas na Tabela 5 e na Tabela 6 estão apresentados o tempo médio entre falhas e de reparo – estimados a partir dos modelos – e a disponibilidade a partir de (9).

Por fim, após verificar a necessidade de melhorias na manutenção para diminuição da ocorrência das falhas, foi proposto um plano de manutenção, baseado na fase da vida útil dos componentes.

Os testes estatísticos e ajuste dos modelos de probabilidade foram feitos com o auxílio do *software* de confiabilidade Weibull++9 (RELIASOFT CORPORATION, 2013) e do *software* estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O objetivo em estudar os tempos de reparo dos moinhos é o de verificar o comportamento do MTTR ao longo dos meses. Verifica-se na Tabela 2 que, em média, o tempo de reparo cai consideravelmente, com exceção do aumento observado no mês de Julho – influenciado por paradas de manutenção superiores a quatro horas.

O decréscimo do MTTR é um ponto positivo observado, pois indica que, com o passar dos meses, há uma diminuição do tempo de parada, isto é, há um aumento do tempo que o equipamento ficou em produção.

Os intervalos de confiança de 95% para cada MTTR apresentaram grande amplitude devido aos diversos modos de falha observados nos equipamentos, isto é, não foi feita uma estratificação pelos modos de falha. Estes intervalos indicam que o tempo médio de reparo do equipamento assume valores entre  $l_i$  e  $l_s$  com 95% de confiança, onde  $l_i$  e  $l_s$  é o limite inferior e superior de cada intervalo, respectivamente.

Tabela 2 – MTTR estimado pelo modelo Lognormal

Mês	MTTR (horas)	IC 95%
Abril	1:28	[0:19; 2:36]
Mai	1:27	[0:23; 2:30]
Junho	0:53	[0:37; 1:08]
Julho	1:41	[0:30; 2:51]
Agosto	0:48	[0:24; 1:11]
Setembro	0:38	[0:25; 0:50]
Geral	0:57	[0:43; 1:10]

Fonte: Autoria própria (2014)

Considera-se aqui que o reparo do equipamento seja capaz de recuperar suas condições iniciais de operação. Na literatura essa premissa é válida e conhecida pelo termo ‘tão bom quanto novo’ (*as good as new*) (ASCHER; FIENGOLD, 1984).

Mesmo considerando o reparo como sendo tão bom quanto novo, na Tabela 3 verifica-se que o MTBF está caindo ao longo dos meses. Isso significa que o reparo não tem sido muito eficiente no que diz respeito a diminuir a ocorrência das falhas. Visando sempre aumentar o tempo de produção dos equipamentos a meta estipulada é que, por mês, as falhas ocorram a cada 49:27 horas. No período verificado a meta foi alcançada somente duas vezes: em abril e maio.

Tabela 3 – MTBF estimado pelo modelo de Weibull

Mês	MTBF (horas)	IC 95%
Abril	78:18	[28:13; 219:15]
Maio	58:20	[31:06; 106:93]
Junho	19:39	[12:24; 30:32]
Julho	27:01	[13:99; 45:93]
Agosto	20:35	[14:02; 29:08]
Setembro	10:05	[7:31; 12:92]
Geral	22:49	[15:10; 30:28]

Fonte: Autoria própria (2014)

A mesma discussão apresentada para os intervalos de confiança dos tempos de reparo também é válida para os tempos de falha, pois observa-se alguns intervalos com grande amplitude.

Nessas estimativas intervalares estão incorporados os diversos modos de falha observados nos equipamentos somado ao fato de que o tamanho da amostra em cada mês se difere – em alguns meses ocorreram menos falhas, o que reduz o tamanho da amostra para o mês.

A Figura 2 apresenta os gráficos de referência no estudo da Engenharia da Confiabilidade, são eles: a função densidade de probabilidade (superior esquerdo), função de distribuição acumulada (superior direito), função de confiabilidade (inferior esquerdo) e a função taxa de falha (inferior direito). Os gráficos foram gerados considerando o ajuste do modelo de Weibull para todos os dados de falha (sem a estratificação pelo mês), onde  $\hat{\beta} = 0,61$  e  $\hat{\eta} = 25,7$ .

No gráfico da confiabilidade os pontos representam a curva da confiabilidade estimada por Kaplan-Meier. Este método calcula a confiabilidade cada vez que



ocorre uma falha e cada ponto corresponde a uma falha observada. A linha contínua que segue os pontos representa a confiabilidade estimada pelo modelo de Weibull, ou seja, pelo modelo é possível estimar a confiabilidade para qualquer tempo, mesmo que não tenha sido observada nenhuma falha no período. A expressão matemática do estimador de Kaplan-Meier bem como sua variância e outras propriedades podem ser consultadas em Dillenburg (2005, p. 32).

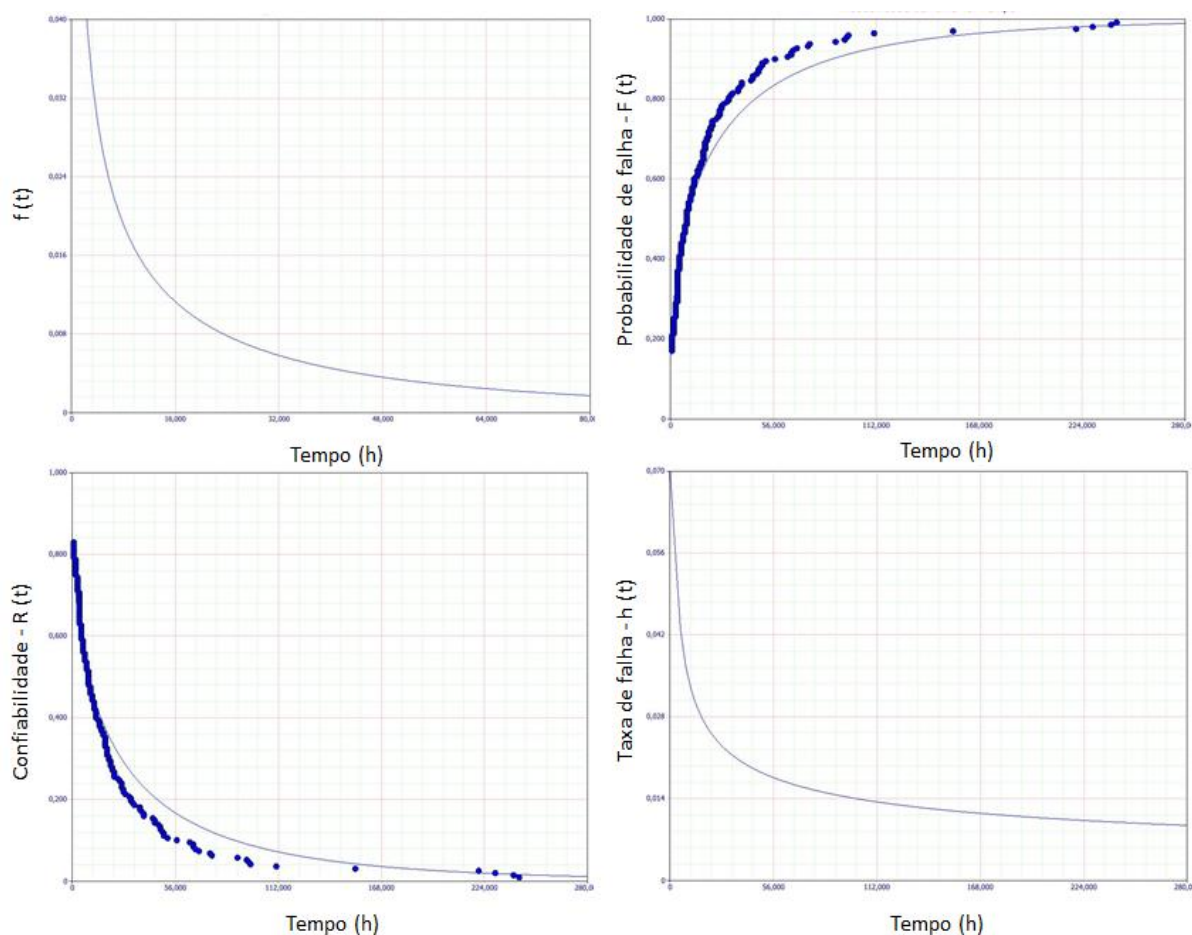


Figura 2 – Forma das funções de densidade  $f_T(t)$ , de distribuição acumulada  $F_T(t)$ , de confiabilidade  $R(t)$  e de taxa de falha  $h(t)$ .

Fonte: Autoria própria (2014)

O intuito em se estudar a disponibilidade dos equipamentos é o de verificar a disponibilidade mensal e geral. De acordo com a Tabela 4 a maior disponibilidade observada se deu no primeiro mês (98,2%). Em todo o período observado a disponibilidade ficou acima de 94,1% e no geral chegou a 96,0%.

Tabela 4 – Disponibilidade observada

Mês	Disponibilidade
Abril	0,982
Maio	0,976
Junho	0,957
Julho	0,941
Agosto	0,963
Setembro	0,941
Geral	0,960

Fonte: Autoria própria (2014)

Em uma etapa posterior foi feito um estudo para verificar quais componentes apresentaram maior incidência de falhas e os que se destacaram foram a válvula rotativa e o hedler. A Figura 3 apresenta a estimativa da confiabilidade de cada componente pelo método de Kaplan-Meier. Para a meta estipulada ( $t = 49:27h$ ), a confiabilidade da válvula rotativa foi de 55,6% e a do hedler de 19,1%. Observa-se que a curva referente à válvula tem um decrescimento mais lento em relação à curva do hedler. Isso indica que as falhas estão ocorrendo com menos frequência na válvula, portanto a confiabilidade da válvula demora mais para cair em relação à confiabilidade do hedler.

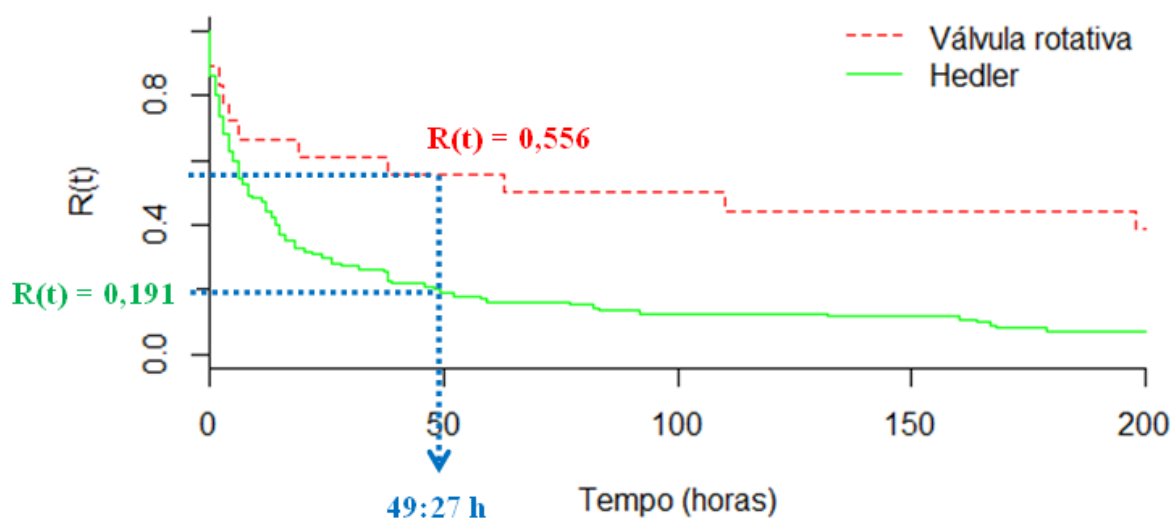


Figura 3 – Confiabilidade estimada por Kaplan-Meier

Fonte: Autoria própria (2014)

Foi ajustado um modelo de probabilidade para os dados de falha e de reparo para cada um dos componentes e na Tabela 5 estão apresentados os modelos e a estimativa dos parâmetros.

Tabela 5 – Ajuste e estimativa dos parâmetros dos modelos.

Componente	Modelo	Distribuição	Parâmetros
Válvula rotativa	Confiabilidade	Weibull	$\hat{\beta} = 0,601$ ; $\hat{\eta} = 198,85$
	Mantenabilidade	Lognormal	$\hat{\mu} = 16,58$ $\hat{\sigma} = 3,11$
Hedler	Confiabilidade	Weibull	$\hat{\beta} = 0,497$ ; $\hat{\eta} = 40,51$
	Mantenabilidade	Lognormal	$\hat{\mu} = 2,58$ ; $\hat{\sigma} = 1,92$

Fonte: Aatoria própria (2014)

O modelo de Weibull se ajustou aos dados de falha dos dois componentes e observando a estimativa de beta nos dois casos ( $\hat{\beta} < 1$ ), é possível afirmar que tanto a válvula como o hedler apresentam características de falhas prematuras, representado pelo período inicial da curva da banheira. Segundo Lafraia (2001, p.52) a melhor estratégia de manutenção é a corretiva seguida de análise de causas raízes e reengenharia.

Kardec e Nascif (2001, p.36) comentam que este tipo de manutenção ocorre quando o objetivo é corrigir ou restaurar as condições de funcionamento do equipamento, seja quando este apresenta um defeito ou um desempenho diferente do esperado.

Vale ressaltar que, segundo Kardec e Nascif (2001, p.39), este tipo de ação é distinta da manutenção preventiva, pois na preventiva a intervenção é feita com o objetivo de reduzir ou evitar a falha ou a queda no desempenho.

Com a manutenção corretiva planejada é possível intervir quando o moinho apresentar um desempenho menor no processamento de materiais e certamente é mais barato, rápido e seguro do que uma intervenção após a quebra de algum componente (o que pode ocasionar a parada total no sistema de produção).

A implementação da manutenção corretiva planejada nos componentes possibilitará: compatibilizar a necessidade da intervenção com os interesses da

produção; melhor planejamento dos serviços; garantir a existência de sobressalentes, equipamentos e ferramental necessário.

A partir dos modelos foi possível estimar o tempo médio entre falhas e de reparo de cada componente e estão apresentados na Tabela 6. O MTBF é expressivamente maior no caso da válvula, indicando menor ocorrência de falhas. Em média, a cada 254 horas foi registrado uma falha na válvula, e no hedler a cada 53 horas.

Tabela 6 – Estimativas de parâmetros

Componente	MTBF	IC <sub>MTBF</sub> 95%	MTTR	IC <sub>MTTR</sub> 95%
Válvula rotativa	254:13	[247:01; 261:35]	1:22	[0:45; 1:58]
Hedler	53:11	[49:03; 57:18]	0:41	[0:24; 0:57]

Fonte: Autoria própria (2014)

A Figura 4 apresenta os gráficos da função densidade de probabilidade (superior esquerdo), da função de distribuição acumulada (superior direito), de confiabilidade (inferior esquerdo) e da taxa de falha (inferior direito) estimadas pelo modelo de Weibull para a válvula rotativa. No gráfico da taxa de falha observa-se que existe alta probabilidade de ocorrência de falha nos tempos iniciais, porém esta é decrescente.

Esses elementos reforçam que a válvula apresenta características de falhas prematuras – observado na estimativa de  $\hat{\beta}$  apresentado na Tabela 5 – e isso se ocorre porque tem operado fora da especificação por não suportar o acúmulo de resíduos em seu interior.

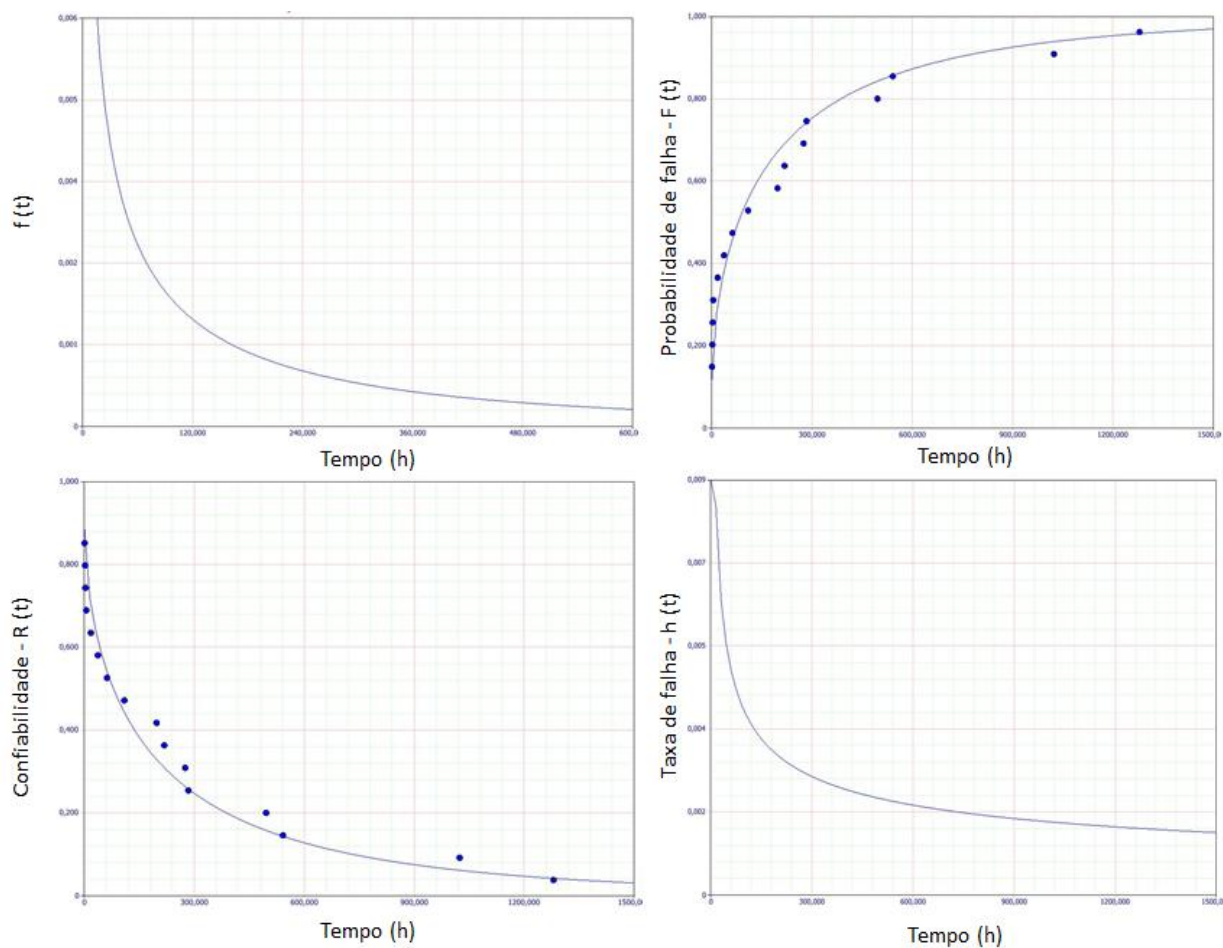


Figura 4 – Forma das funções de densidade  $f_T(t)$ , de distribuição acumulada  $F_T(t)$ , de confiabilidade  $R(t)$  e de taxa de falha  $h(t)$  para a válvula rotativa.

Fonte: Autoria própria (2014)

A Figura 5 apresenta os mesmos gráficos estimados pelo modelo de Weibull, considerando agora o estudo do hedler. O gráfico de taxa de falha deste componente também indica características de falhas prematuras, pois além de serem observados os elementos discutidos anteriormente, o gráfico assume a forma da curva da banheira no período inicial.

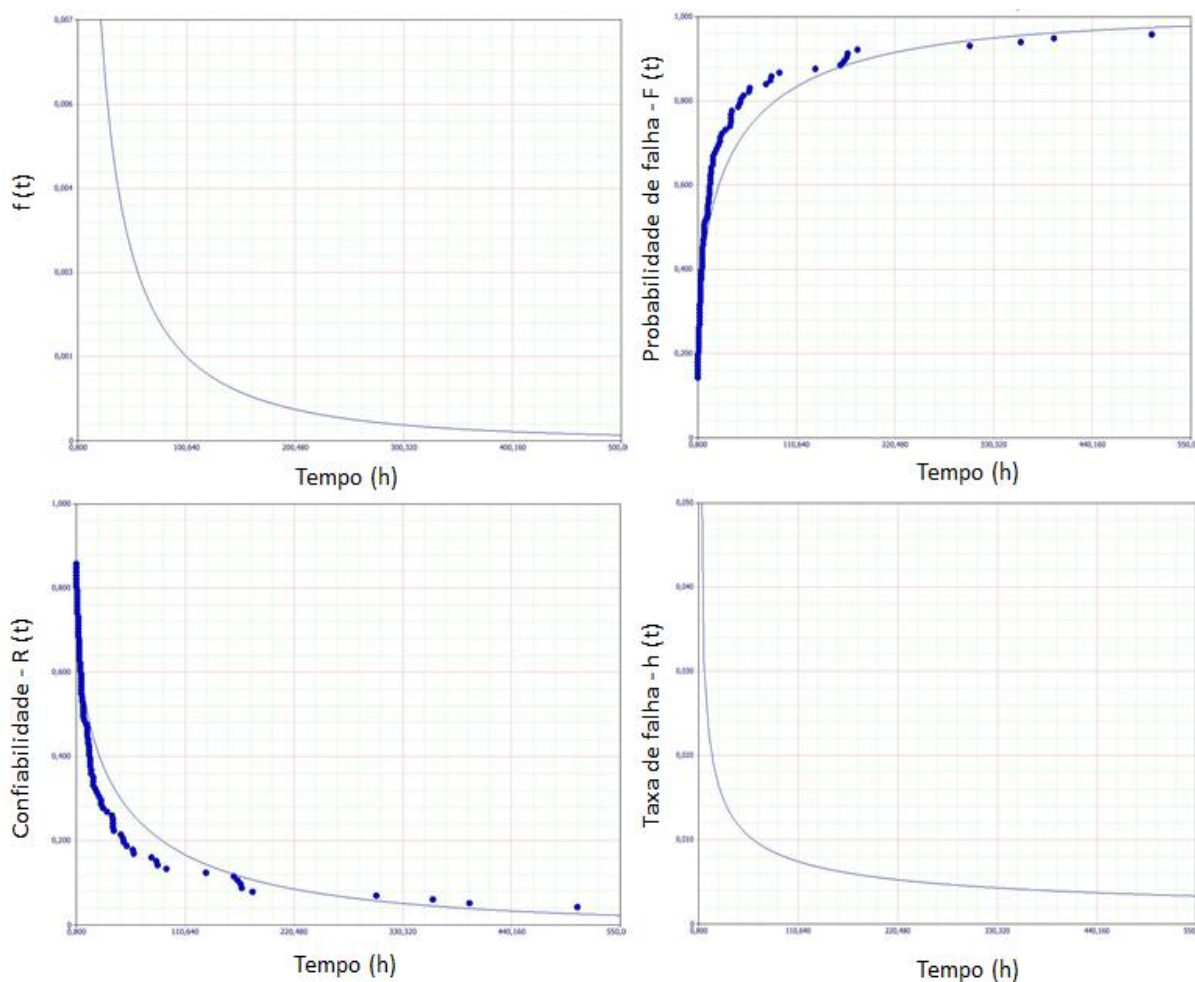


Figura 5 – Forma das funções de densidade  $f_T(t)$ , de distribuição acumulada  $F_T(t)$ , de confiabilidade  $R(t)$  e de taxa de falha  $h(t)$  para o hedler.

Fonte: Autoria própria (2014)

Estes gráficos (Figuras 4 e 5) reforçam o que foi observado e discutido nas curvas de Kaplan-Meier (Figura 3) e nos valores de MTBF e MTTR estimados (Tabela 6), isto é, existe maior incidência de falhas ocorrendo no hedler o que consequentemente reduz de maneira mais rápida a confiabilidade do componente.

Vale ressaltar que tanto a válvula como o hedler foram os componentes que apresentaram maior incidência de falhas no período, portanto as políticas de manutenção discutidas devem ser priorizadas para os dois, com prioridade ainda maior para o hedler que se apresentou mais crítico.

Pela característica das falhas, apontada no estudo, supõe-se que os principais motivos de sua alta ocorrência nos componentes sejam a baixa qualidade dos mesmos e/ou que estejam operando fora de especificação. Com base nisso, para evitar a necessidade de muitas paradas no processo algumas ações podem ser

tomadas: a implementação de rotinas para evitar o acúmulo de resíduos no interior dos componentes, buscar soluções para suportar o acúmulo ou até mesmo providenciar sobressalentes de melhor qualidade.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste trabalho foi estudar a confiabilidade de moinhos de uma maneira geral e depois verificar os componentes mais críticos para então propor políticas de manutenção adequadas que otimizem a capacidade de produção dessas máquinas.

Com base nesses indicadores foi possível verificar: i) a redução mensal do tempo de reparo dos moinhos; ii) aumento da ocorrência de falhas no decorrer do período, fazendo com que a meta estipulada fosse alcançada apenas duas vezes em todo período estudado; iii) a disponibilidade dos moinhos atingiu 96,0%; iv) constatou-se que tanto a válvula rotativa como o hedler apresentam características de falhas prematuras ( $\hat{\beta} < 1$ ), por isso a melhor estratégia a ser adotada é a manutenção corretiva planejada por ser mais barata e segura do que um trabalho não planejado.

A partir desses resultados podem ser colocadas em prática, em etapas posteriores, estratégias internas para o aumento da disponibilidade, envolvendo todos os níveis hierárquicos da organização como a retomada da conversa com fornecedores, por exemplo.

Tais estratégias visam o aumento da disponibilidade dos moinhos e conseqüentemente, a melhora na produção.

### 6.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Para possível continuidade da pesquisa indica-se o estudo considerando grande parte dos componentes dos moinhos para a obtenção da confiabilidade do sistema no geral.

Dessa forma seria possível fazer a construção do Diagrama de Blocos de Confiabilidade (Reliability Block Diagram – RBD) e a análise estatística completa do sistema como um todo.



Outra sugestão seria estudar a relação das manutenções praticadas atualmente (preventivas e corretivas) com seu impacto financeiro para a organização, visando a redução dos custos de manutenção e o aumento da disponibilidade das máquinas.

## REFERÊNCIAS

ASCHER, Harold. FEINGOLD, Harry. **Repairable systems reliability: modeling, inference, misconceptions and their causes**. New York: Marcel Dekker, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5642. Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO, 2011. **A falha não é uma opção**. Disponível em: <http://www.abraman.org.br/sidebar/bibliotecas-e-publicacoes/apostilas-artigos-boletins-e-trabalhos-tecnicos>. Acesso em: 18 nov. 2014.

DILLENBURG, Marcos. R. **Estimativas de confiabilidade de produto a partir das contagens mensais de vendas e falhas ao longo do período de garantia**. 2005. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Qualidade) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

DODSON, Bryan; NOLAN, Dennis. **Reliability engineering handbook**. N. York: Marcel Dekker, 2002.

FAGUNDES, Angelyna *et al.* **Estudo de caso: análise quantitativa de confiabilidade e disponibilidade de um torno CNC, baseado na metodologia RCM (Reliability Centred Maintenance), aplicado a área de manutenção industrial**. XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Belo Horizonte, 2011.

FREITAS, Marta. A; COLOSIMO, Enrico. A. **Confiabilidade: Análise do tempo de falha e testes de vida acelerados**. Belo Horizonte : Fundação Cristiano Ottoni, 1997. 308p (Série Ferramentas da Qualidade, v. 12)

IRESO, W. G; COOMBS, Clyde. F; MOSS, Richard. Y. **Handbook of Reliability Engineering and Management**. N. York: McGraw-Hill, 1996.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LAFRAIA, João. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2001.

MOUBRAY, John. **Reliability centred maintenance (RCM) – Manutenção Centrada em Confiabilidade**. Edição Brasileira - traduzido por Kleber Siqueira- 2ed. Lutterworth, Inglaterra: Aladon Ltda, 2000.

R DEVELOPMENT CORE TEAM (2011). **R: a language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>

RELIASOFT CORPORATION. Weibull++ 9.0.2.1. **Software Package**, Tucson, AZ, 2013. URL [http://www.ReliaSoft.com/license\\_compare.htm](http://www.ReliaSoft.com/license_compare.htm)

SANTOS, Ismar. S. **Metodologia para otimização da manutenção de equipamentos e sistemas**. 1996. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Qualidade) – Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

WUTTKE, Régis. A. **Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico**. Associação Brasileira de Engenharia de Produção – ABEPRO. Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.