

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA
CURSO DE MBE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS**

WILLIAM BRUSIUS JR

**ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE PARA
TRÊS MAQUINAS DE PRODUÇÃO EM UMA EMPRESA DE TRANSFORMAÇÃO
MECÂNICA**

Porto Alegre

2016

William Brusius Jr.

**ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE PARA
TRÊS MAQUINAS DE PRODUÇÃO EM UMA EMPRESA DE TRANSFORMAÇÃO
MECÂNICA**

Artigo apresentado como requisito parcial
para obtenção do título de Especialista em
Engenharia de Produção e Sistemas, pelo
Curso de MBE em Engenharia de
Produção e Sistemas da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Miguel Afonso Sellito

Porto Alegre

2016

ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE PARA TRÊS MAQUINAS DE PRODUÇÃO EM UMA EMPRESA DE TRANSFORMAÇÃO MECÂNICA

William Brusius Jr
Miguel Afonso Sellitto

Resumo: O objetivo desse artigo foi definir uma estratégia de manutenção para três máquinas em um site de transformação mecânico de vergalhões. O método de pesquisa escolhido foi a modelagem quantitativa. O estudo foi baseado nos conceitos da RCM (Reliability Centered Maintenance – Manutenção centrada na confiabilidade). Para pesquisa, foram coletados dados de tempo entre falhas (TBF) e tempos até o reparo (TTR) para os três equipamentos que trabalham em paralelo de abril de 2014 até setembro de 2015. Com auxílio do *software* ProConf 2000, as distribuições Weibull e exponencial modelaram os TBF e a distribuição lognormal modelaram os TTR. Foram calculadas as curvas de confiabilidade para cada equipamento e as disponibilidades $Av(t)$ ficaram entre 97% a 98%. Também foi calculada a curva de confiabilidade para o sistema composto pelos três equipamentos. Com fatores de forma foi possível posicionar os equipamentos na curva da banheira e definir a estratégia de manutenção para cada máquina. A manutenção corretiva, com objetivo de eliminar falhas de projeto e instalação, e manutenção preditiva, onde é realizado o monitoramento das falhas e a intervenção quando necessário antes que a falha paralise a produção, são as estratégias indicadas para os equipamentos.

Palavras-chave: Confiabilidade; manutenibilidade; disponibilidade; estratégia de manutenção.

Abstract: The purpose of this article was to define a maintenance strategy for three machines in a site of mechanical processing rebar. The research method chosen was quantitative modeling. The study was based on the concepts of RCM (Reliability Centered Maintenance). Records have been collected on time between failures (TBF) and time-to-repair (TTR) for the three machines working in parallel for April 2014 until September 2015. With the help of software ProConf 2000, Weibull and exponential distribution shaped the TBF and the lognormal distribution shaped the TTR. The reliability curves were calculated for each equipment and the availability $Av(t)$ were between 97% to 98%. Also the reliability curve was calculated for the system composed of the three machine. With form factors was possible to position the equipment on the bathtub curve and set the maintenance strategy for each machine. The strategies indicated for the equipments were: corrective maintenance, in order to eliminate design flaws and installation, and predictive maintenance, which consist in monitoring of failures and intervention when necessary before the failure paralyze the production.

Key words: Reliability; maintainability; availability; maintenance strategy.

1 INTRODUÇÃO

No atual cenário econômico, onde o excesso de capacidade produtiva e a baixa demanda do mercado siderúrgico tem exigido das empresas reduções de custos e aumento constante da produtividade operacional. Para esses dois desafios a estratégia de manutenção utilizada tem um papel de grande importância, pois adotando a estratégia mais adequada é possível aumentar a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos sem necessariamente elevar os gastos de manutenção.

A indisponibilidade de equipamentos considerados críticos em um processo fabril podem acarretar atrasos nos prazos de entregas, insatisfação dos clientes e aumentando dos custos operacionais para empresa. Nesse cenário é importante que máquinas críticas tenham alta confiabilidade e manutenibilidade, por consequência uma alta disponibilidade. Confiabilidade é a probabilidade de um equipamento ou sistema de produção opere nas condições de projeto, sem apresentar uma falha por um determinado tempo. Manutenibilidade é a probabilidade que, caso ocorra uma falha, o conserto seja realizado até um dado tempo (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009). Disponibilidade é a relação entre o tempo em que o equipamento ou sistema está disponível e o tempo total previsto para operação.

A escolha da estratégia de manutenção para diferentes segmentos da indústria pode ser baseada em técnicas e métodos quantitativos. Existem várias técnicas e métodos que utilizam dados quantitativos que foram estudados e aplicados para definição de estratégia de manutenção nos últimos anos. A RCM (*Reliability Centered Maintenance* – Manutenção Centrada na Confiabilidade) é um dos métodos mais difundidos e usado (SELLITO, 2007). A RCM tem como objetivos: identificar os modos de falhas e suas consequências; determinar a técnica de manutenção com melhor custo benefício; e o gerenciamento dos dados com intuito de minimizar os riscos e os impactos das falhas.

O objetivo desse artigo é definir uma estratégia de manutenção para um conjunto de três máquinas de corte e dobra de vergalhão situada em um site de transformação mecânica. Os objetivos secundários são: modelar as funções confiabilidade e manutenibilidade, posicionar os equipamentos no ciclo de vida (curva da banheira), e calcular as disponibilidades dos três equipamentos estudados. As

técnicas utilizadas de pesquisa foram a modelagem dos tempos até o reparo (TBF – *time between failures*) e o tempo até o reparo (TTR – *time to repair*).

O restante do trabalho está organizado em: referencial bibliográfico, procedimentos metodológicos; discussão dos resultados; e considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A RCM (*Reliability Centered Maintenance* – Manutenção Centrada na Confiabilidade) teve origem na indústria aeronáutica nos Estados Unidos, porém seus conceitos e técnicas podem ser aplicados a outros segmentos da indústria (SIQUEIRA, 2009). O modelo binário é o mais difundido para representar a condição de um equipamento ou sistema: em funcionamento ou em falha (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009). Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), para implementação da RCM é essencial a existência de um banco de dados que registre e classifique as falhas ocorridas no sistema. Com essas informações é possível os cálculos dos tempos médios entre falhas (*MTBF – mean time before fail*) e tempos médios até o reparo (*MTTR – mean time to repair*) dos equipamentos ou sistemas (MENDES, 2011).

2.1 Funções de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade

A definição da função confiabilidade é determinada pela modelagem dos tempos até a falha do equipamento em estudo através de uma distribuição de probabilidade. As funções mais difundidas para análise da confiabilidade são: função densidade de falhas $f(t)$, função acumulada de falhas $F(t)$, função confiabilidade $R(t)$ e a função taxa de falha $h(t)$. Fogliatto e Riberio (2009) apresentam as expressões que seguem.

A função densidade de falha $f(t)$ representa a variação da probabilidade de falhas por unidade de tempo. É representada pela função de distribuição de probabilidade expressa pela equação (1).

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (1)$$

A função acumulada de falhas $F(t)$ calcula a probabilidade de ocorrer uma falha entre um período t_1 e t_2 . É representada pela função de distribuição de densidade acumulada e expressa pela equação (2).

$$F(t_2) - F(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} f(t)dt \quad (2)$$

A função confiabilidade $R(t)$ é a probabilidade de não haver falhas entre um determinado período. É representado pela equação (3). Sellitto (2005) apresenta as equações (4) para cálculo de confiabilidade em sistemas em série, e a equação (5) para sistemas em paralelo.

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 - \int_{-\infty}^t f(t)dt = 1 - F(t) \quad (3)$$

$$R_{série} = \prod_{i=1}^n R(n) \quad (4)$$

$$R_{paralelo} = [1 - \prod_{i=1}^n (1 - R(n))] \quad (5)$$

A função de taxa de falha $h(t)$ é a probabilidade condicional de que ocorra a falha no intervalo de t a $t+\Delta t$, dado que não houve falha em t . É representada pela equação (6),

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} \quad (6)$$

O valor esperado para o tempo até a primeira falha ou entre falhas é o *MTBF*. É representado pela equação (7).

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt - \int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt \quad (7)$$

A função de densidade de probabilidade do tempo de reparo $m(t)$ é representada pela equação (8), onde $m(t)$ é a probabilidade que o reparo ocorra entre o tempo de t a $t+\Delta t$ (LEWIS, 1996). A função mantabilidade $M(t)$, representada pela

equação (9), informa a probabilidade, caso ocorra uma falha no equipamento, de o reparo seja concluído até o tempo t . O $MTTR$, tempo médio para reparo, é dado pela equação (10).

$$m(t) \cdot \Delta t = P[t \leq T \leq t + \Delta t] \quad (8)$$

$$M(t) = \int_0^t m(t) dt \quad (9)$$

$$MTTR = \int_0^{\infty} t \cdot m(t) dt \quad (10)$$

A função disponibilidade $Av(t)$ é a relação entre o tempo disponível de um equipamento e o tempo total para sua operação. O tempo disponível é o tempo entre duas falhas (TBF) e o tempo total é o tempo disponível mais o tempo necessário para reparo (TTR). A função $Av(t)$ é expressa na equação (11).

$$Av(t) = \frac{\text{Tempo Disponvel}}{\text{Tempo Total}} = \frac{MTBF}{MTFB+MTTR} \quad (11)$$

Segundo Sellitto (2005), para melhorar a disponibilidade de um equipamento duas estratégias podem ser adotadas: Aceita-se que ocorrerá falhas e reduz-se o $MTTR$ através de técnicas de engenharia voltadas para manutenibilidade e/ou reduz-se o $MTBF$, por meio de técnicas de projetos voltadas para confiabilidade.

2.2 – Distribuições de Probabilidade em Manutenção

Devido à natureza aleatórias das variáveis TBF e TTR, o tempo até a próxima falha ou reparo não são previsíveis. As distribuições de probabilidades são essenciais para modelar o tempo até a falha (LEWIS, 1996). As distribuições de probabilidade mais utilizadas na manutenção são as distribuições de Weibull, exponencial, gamma e lognormal (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009). A distribuição normal é citada pelos autores, porém com pouca aplicação para análise de confiabilidade na manutenção.

A distribuição de Weibull por possuir uma flexibilidade é a mais importante e usual, pois consegue modelar comportamentos distintos para função de taxa de falha $h(t)$. A distribuição utiliza um fator de forma γ que define se a taxa de falha $h(t)$ é decrescente com $\gamma < 1$, se é constante, quando $\gamma = 1$, e crescente se $\gamma > 1$. A distribuição de Weibull explica o comportamento das falhas de equipamentos em série, nos quais as funções entre eles estão diretamente relacionadas, ou seja, quando o primeiro item falhar, ocorrerá a falha geral do equipamento. A distribuição de Weibull pode ser entendida como casos particulares de outras distribuições. Quando $\gamma = 1$, Weibull recai na exponencial. Se $\gamma = 2$, a Weibull se transforma na distribuição de Rayleigh, e quando $\gamma = 3,2$, a distribuição de Weibull é similar ao da distribuição normal (LEWIS, 1996).

As expressões matemáticas que representam o modelo de confiabilidade da distribuição de Weibull são expressas pelas equações (12) a (15) (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t-t_0}{\theta} \right)^{\gamma-1} \cdot e \left[- \left(\frac{t-t_0}{\theta} \right)^\gamma \right] \quad 0 \leq t \leq \infty \quad (12)$$

$$h(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t-t_0}{\theta} \right)^{\gamma-1} \quad (13)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\theta} \right)^\gamma} \quad (14)$$

$$MTBF \text{ ou } MTTR = t_0 + \theta^{\frac{1}{\gamma}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (15)$$

Onde:

t_0 = tempo isento de falha;

γ = parâmetro de forma;

θ = parâmetro de escala;

t = tempo até a falha

A distribuição exponencial descreve sistemas ou equipamentos que apresentam taxas de falhas constantes. Ela é utilizada, preferencialmente, para TBF onde Weibull não consegue modelar os dados. As equações da distribuição

exponencial são expressas pelas equações (16) a (19) (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (16)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (17)$$

$$h(t) = \lambda \quad (18)$$

$$MTBF \text{ ou } MTTR = \frac{1}{\lambda} \quad (19)$$

Onde:

λ = taxa de falha

t = tempo até a falha;

A distribuição lognormal é utilizada para componentes que apresentam desgaste, tais como peças metálicas sujeitos a falha por corrosão, fadiga ou trincas. A distribuição longnormal são expressas pelas equações (20) a (23) para $t \geq 0$ (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2 \right]} \quad (20)$$

$$R(t) = \Phi \left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma} \right) \quad (21)$$

$$h(t) = \frac{\varphi[(\mu - \ln t)/\sigma]/\sigma t}{\Phi[(\mu - \ln t)/\sigma]} \quad (22)$$

$$MTBF \text{ ou } MTTR = e^{(\mu + \sigma^2)/2} \quad (23)$$

Onde:

Φ = valor da função de distribuição da distribuição normal avaliada em x ;

φ = valor da função de densidade da distribuição normal avaliada em x ;

μ = média do logaritmo dos dados;

σ = desvio padrão do logaritmo dos dados;

t = tempo até a falha;

A distribuição gamma é uma distribuição contínua, generalizada da distribuição exponencial. Ela pode descrever sistemas que possuem componentes operando em paralelo, em que para o sistema falhar todos os componentes devem falhar. A distribuição de gamma são expressas pelas equações de (24) a (27), para $t \geq 0, \gamma > 0$ e $\lambda > 0$ (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(\gamma)} (\lambda t)^{\gamma-1} e^{-\lambda t} \quad (24)$$

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^{\lambda t} x^{\gamma-1} e^{-x} dx \quad (25)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (26)$$

$$MTBF \text{ ou } MTTR = \frac{\gamma}{\lambda} \quad (27)$$

Onde:

Γ = função gamma;

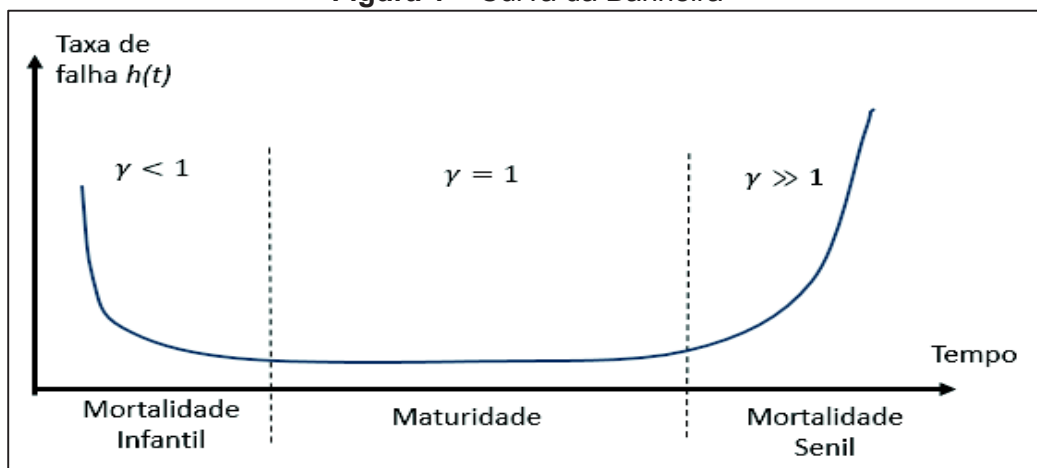
γ = parâmetro de forma;

λ = parâmetro de escala;

t = tempo até a falha;

2.3 Curva da Banheira e Estratégia de Manutenção

Figura 1 – Curva da Banheira



Fonte: adaptado de Sellitto (2005)

A Curva da banheira (*bathhtub curve* em inglês) representa o comportamento da taxa de falha de um equipamento ou sistema ao longo do tempo. A curva da banheira, Figura 1, divide o ciclo de vida de um equipamento em três períodos: mortalidade infantil, maturidade e mortalidade senil (SELLITTO, 2005). Cada fase da curva está relacionada a um comportamento da função de taxa de falha $h(t)$ e pelo fator de forma γ da distribuição de Weibull. Sellitto (2005), associa uma estratégia de manutenção para cada fase da curva.

Na mortalidade infantil, a taxa de falha é alta, porém decrescente. As falhas que ocorrem são prematuras e causadas por erros de projetos, peças defeituosas, mão-de-obra destreinada, instalação incorreta entre outras (LAFRAIA, 2001). A estratégia para essa fase é a manutenção corretiva. Na qual identifica as falhas e corrige as deficiências de projeto ou instalação do equipamento (SELLITTO, 2005). Com a correção dessas falhas, a taxa de falha para esse equipamento tende a evoluir para a maturidade (MACCHI et al., 2012). A escolha de manutenção corretiva como estratégia de manutenção se justifica quando as eventuais quebras do equipamento não causam grandes impactos na produção (MONCHY, 1989).

No período intermediário, chamado de maturidade, a taxa de falha é constante (SELLITTO, 2005). As falhas são aleatórias e ocorrem devido a fatores menos controláveis, tais como: erros humanos, sobrecarga, vibração, impactos mecânicos, acidentes, matéria prima defeituosa ou operação inadequada (LAFRAIA, 2001). A estratégia de manutenção recomendada para esse período é a manutenção preditiva. Esse tipo de manutenção é realizado através de inspeções periódicas e planejadas. Quando a degradação de um componente ou subconjunto do equipamento atinge um limite estabelecido, uma manutenção é executada antes que ocorra a falha (SELLITO, 2005). Segundo Corrêa e Corrêa (2010), a estratégia de manutenção preditiva é indicada para equipamentos ou sistema que geram altos custos quando parados.

A última fase é chamada de mortalidade senil (SELLITO, 2005) e de desgaste por Lafrais (2001). Nesse período, ocorre o aumento crescente da taxa de falhas, causadas por desgaste, corrosão, fim da vida útil, degradação mecânica e elétrica, ou vida de projeto muito curta. Os autores indicam a manutenção preventiva para essa fase, onde devem ocorrer a troca preventiva de componentes visando aumento da vida útil do equipamento, retornando esse para fase de maturidade (SELLITTO, 2005). Com a estratégia de manutenção preventiva, há diminuição de paradas não

programadas no equipamento, porém podem ocorrer intervenções desnecessária, ocasionando custos elevados de manutenção (MACCHI et al., 2012).

Sellito (2005) resume as diferentes estratégias de manutenções utilizadas para as três fases da curva da banheira. O Tabela 1 mostra as diferentes estratégias de manutenção para cada fase do ciclo de vida.

Tabela 1- Relação entre fases da curva da banheira e estratégia de manutenção

Fases	Estratégia	Decorrência
Mortalidade Infantil, falhas de origem	emergência	retarda ou até impede o fim da mortalidade infantil ao não reforçar os itens que quebram ou não remover as causas das falhas de origem
	corretiva	antecipa o fim da mortalidade infantil ao reforçar os itens que quebram ou remover as causas das falhas de origem
	previdiva	monitora as falhas em progresso que podem resultar em quebra, mas estas são 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 tem falhas de origem
maturidade, falhas aleatórias	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 passar da primeira fase
	previdiva	informa, o início e monitora os processos de falhas progressivas que resultarão em quebrar, podendo prever aumentos na probabilidade da quebra
	preventiva	retorna à mortalidade infantil ao troca 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
	previdiva	monitora os processos progressivos de falhas já iniciadas prevendo 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: Sellito (2005)

3 PESQUISA

O método de pesquisa adotado foi a modelagem quantitativa. A modelagem quantitativa utiliza técnicas analíticas para descrever o comportamento de um objeto

em estudo (NAKANO, 2010). A estratégia de manutenção a ser definida é uma das citadas anteriormente: emergencial, corretiva, preditiva ou preventiva. Para isso, foi obtida a função de taxa de falhas dos equipamentos, o *MTBF* e *MTTR* conforme modelos matemáticos que melhor modelou os dados coletados. Com isso foi possível descobrir em qual período da curva da banheira cada equipamento se encontra e escolher a estratégia de manutenção. Também, foi calculado a disponibilidade e função confiabilidade de cada equipamento e do sistema que as três máquinas formam.

Para esse estudo foi utilizado o software *ProConf 2000* que é um programa computacional que faz uso de métodos analíticos e gráficos para modelar dados de tempo de falhas e reparos a distribuições probabilísticas conhecidas: Weibull, Gamma, exponencial, lognormal e normal. O aplicativo ajusta os dados por máxima verossimilhança pelos testes de Qui-quadrado (χ^2) e Kolmogorov-Smirnov (KS). Para cada teste, o *software* calcula o nível de significância. Para valores acima de 5%, ele indica qual das distribuições não podem ser rejeitadas. O *ProConf 2000* também fornece análises gráficas e matemáticas como as funções confiabilidade e seus parâmetros de forma (FRITSCH e RIBEIRO, 1998).

Quando mais do que uma distribuição não for rejeitada pelo *software*, a escolha de uma delas deve ser justificada por uma fundamentação teórica. Como premissa de escolha, Mengue e Sellitto (2013) definem as seguinte regras: para os tempos entre falhas (TBF), se a distribuição de Weibull ajustar os dados, as demais distribuições devem ser desconsideradas; se a distribuição exponencial também ajustar, ela deve ser adotada; para os tempos até o reparo (TTR), se a distribuição normal ou lognormal ajustarem os dados, as demais devem ser desconsideradas.

As três máquinas em análise são máquinas estribadeiras de vergalhão do ano 1998. Esse modelo de equipamento consiste em vários subsistemas que trabalham em série, tais como sistema elétrico, sistema de segurança NR12, sistema hidráulico e sistema mecânico. As três máquinas juntas formam o sistema em paralelo de produção de vergalhão de diâmetros médios, de 10 a 16mm, com capacidade de produção de 50% da fábrica, onde a parada não programada de um desses equipamentos gera um atraso na produção ocasionando um desbalanceamento na programação do setor de bitolas médias e da fábrica como um todo, ocasionando atrasos nas entregas para os clientes. O diagrama de blocos do sistema em paralelo

é apresentado na Figura 2. A Tabela 2 apresenta os principais dados técnicos da máquina estribadeira.

O método de pesquisa adotado foi:

- revisão bibliográfica dos conceitos de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade, distribuições de probabilidade aplicados a manutenção e estratégias de manutenção;
- delimitação do sistema de equipamentos a ser estudado;
- obtenção dos dados de TBF e TTR para os 3 equipamentos;
- análise dos dados com auxílio do *software ProConf 2000*;
- cálculo da disponibilidade para cada equipamento e confiabilidade para o sistema;
- discussão dos resultados e proposta de estratégia de manutenção para o sistema composto pelos três equipamentos

Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema

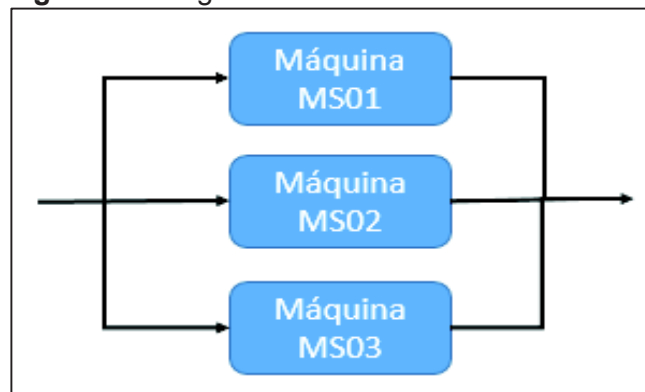


Tabela 2 – Máquina MiniSyntax 16

Dados Técnicos	
Tensão de Entrada	380V - 60Hz
Tensão de Saída	200/415 V - 50/60 Hz
Potência Instalada	34 kW
Capacidade Reservatório Hidráulico	320l
Velocidade de Arraste	0 a 1,5m/s
Velocidade de Dobra	0 a 1000°/s
Tempo de Corte	4/10 s

Fonte: Adaptado do manual de instrução do equipamento

4 LEVANTAMENTO E MODELAGEM DOS DADOS

A empresa possui um sistema de informação na qual os técnicos da manutenção registram todas as falhas que ocasionaram parada do equipamento. Foram analisados dados dos três equipamentos do período de abril de 2014 a setembro de 2015. Não foram considerados os dados de paradas com origem em manutenções programadas, falhas operacionais, falta de energia externa e acidentes com danos materiais. Os três equipamentos são denominados MS01, MS02 e MS03. Será apresentada a análise e modelagem dos dados, valor de disponibilidade e a curva de confiabilidade para cada equipamento, e no final a confiabilidade do sistema formado pelas três máquinas.

4.1 Equipamento MS01

Os dados de TBF e TTR são mostrados nas Tabelas 3 e 4. Para os dados de TBF o ProConf 2000 apresentou os resultados conforme Tabela 5. Pelos testes aplicados, a hipótese que as distribuições de Weibull e gama de adaptam aos dados não pode ser rejeitada. Pelas premissas da pesquisa, foi adotada a distribuição de Weibull, com um fator de forma $\gamma = 0,84$ e parâmetro de escala $\theta = 98,725$.

A Figura 3 e 4 apresentam a curva de taxa de falha $h(t)$ e a curva $R(t)$ para o equipamento MS01.

Tabela 3 – Histórico de dados (TBF)

TBF - Tempo entre falhas (horas)								
43,00	34,00	94,17	22,00	116,25	136,50	4,75	137,50	138,00
479,50	1,92	44,50	14,02	43,50	102,25	85,17	85,00	141,75
15,00	101,67	4,50	118,67	412,83	39,17	23,00	105,83	63,33
212,75	33,50	74,33	72,17	39,50	1,50	488,25	130,50	205,00
11,83	57,17	262,83	26,25	53,50	4,75	161,75	56,67	
53,83	91,17	43,50	19,17	57,83	30,25	93,50	13,83	
52,67	85,67	382,83	123,42	160,50	23,42	110,33	155,00	
142,08	44,42	139,33	1,33	210,50	933,75	118,58	288,75	
1,50	2,17	51,33	109,17	36,00	44,50	178,17	86,00	
97,33	34,58	54,00	173,00	12,67	184,50	163,83	64,83	
121,67	237,33	70,75	19,50	2,83	168,67	2,83	0,17	
52,08	170,67	0,75	42,50	454,50	3,58	13,17	210,00	

Fonte: Sistema de informação da empresa.

Tabela 4 – Histórico de dados (TTR)

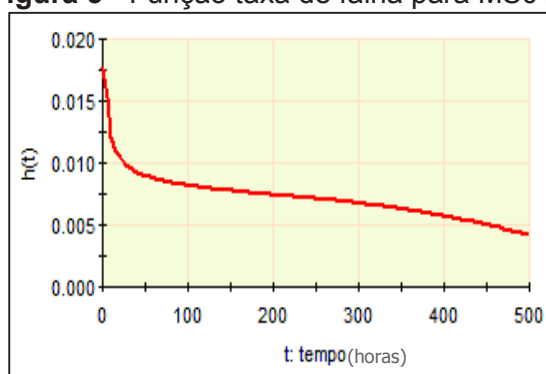
TTR - Tempo até o reparo (horas)								
1,00	0,67	0,33	1,00	5,00	0,50	0,92	3,00	6,00
0,50	0,33	1,50	1,00	2,25	0,25	2,50	13,00	9,75
27,00	0,58	1,50	0,65	0,67	0,83	8,33	0,67	1,17
1,25	4,50	1,00	0,75	6,50	2,00	0,50	1,00	1,50
0,67	2,00	0,83	0,33	1,00	4,75	0,50	0,83	
1,17	0,67	0,50	0,50	1,50	1,50	1,50	1,50	
11,50	0,50	0,67	0,83	3,42	1,08	0,83	1,17	
0,50	0,42	5,33	0,75	1,25	1,00	0,42	1,25	
4,25	1,00	1,00	7,67	3,50	4,00	0,67	4,25	
0,17	0,25	0,50	1,83	2,00	0,50	0,67	0,75	
0,17	0,17	0,33	3,00	8,50	3,00	0,67	7,00	
0,42	0,50	0,67	3,00	0,50	1,08	1,33	6,00	

Fonte: Sistema de informação da empresa

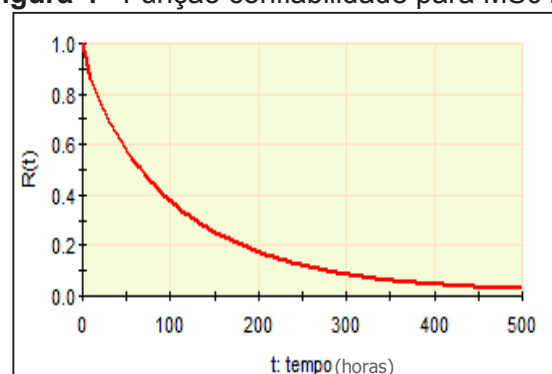
Tabela 5- Testes para TBF da MS01

Distribuição	MTBF	Dados significativos	IC a 95%	Nível de Significância		Decisão
				χ^2	K-S	
Weibull	107,74	$\gamma = 0,84$	0,70 a 0,956	6,29%	17,70%	Não Rejeitada
Exponencial				0,00%	6,11%	Rejeitada
Gamma	108,84	$\gamma = 0,754$	0,582 a 0,949	19,70%	20,12%	Não Rejeitada
Normal				0,00%	0,00%	Rejeitada
Lognormal				0,00%	0,00%	Rejeitada

Fonte: Software ProConf 2000

Figura 3 - Função taxa de falha para MS01

Fonte: Software ProConf 2000

Figura 4- Função confiabilidade para MS01

Fonte: Software ProConf 2000

Para os valores de TTR, o *ProConf 2000* apresentou os resultados da Tabela 6. Todos os testes foram rejeitados. O motivo de nenhuma distribuição probabilística tenha ajustado os dados deve-se ao arredondamento dos dados de parada do equipamento lançados pelos técnicos de manutenção no sistema de informação da

empresa. Para fins de cálculo de disponibilidade, o *MTTR* foi calculado através de média aritmética. Valor encontrado foi de 2,30 horas.

Tabela 6 – Testes para TTR da MS01

Distribuição	MTTR	Nível de Significância		Decisão
		χ^2	K-S	
Weibull	2,26	0,000%	0,00%	Rejeitada
Exponencial	2,30	0,00%	0,00%	Rejeitada
Gamma	2,33	47,64%	0,00%	Rejeitada
Normal	2,30	0,00%	0,00%	Rejeitada
Lognormal	2,11	53,52%	0,00%	Rejeitada

Fonte: Software ProConf 2000

Aplicando os valores encontrados para *MTBF* e *MTTR* na equação (11), obtém-se o valor da disponibilidade $Av(t)$ para o equipamento MS01, conforme equação (26).

$$Av(t) = \frac{107,74}{(107,74+2,30)} = 97,9 \% \quad (26)$$

Pode-se dizer que o equipamento está parado por falha de origem mecânica ou elétrica em 2,1% do tempo. Em 97,9% do tempo em análise, o equipamento este disponível para produção.

4.2 Equipamento MS02

Os dados de TBF e TTR são mostrados nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Histórico de dados (TBF)

TBF - Tempo entre falhas (horas)								
378,00	156,50	108,67	1,67	40,00	91,50	31,00	160,83	1352,50
25,00	123,50	252,83	1,67	471,00	4,00	124,25	562,50	66,50
59,92	257,58	38,75	0,50	164,00	769,33	137,50	262,00	
101,00	148,17	21,75	115,00	100,83	14,83	38,33	296,50	
443,67	100,33	234,83	17,75	17,75	88,50	158,42	53,00	
58,67	18,00	114,00	129,25	102,35	319,00	441,83	509,50	
465,50	188,83	222,33	245,00	615,48	36,75	52,75	114,50	
71,17	20,92	113,75	121,00	236,67	282,00	0,17	344,50	

Fonte: Sistema de informação da empresa

Tabela 8 – Histórico de dados (TTR)

TTR - Tempo até o reparo (horas)								
1,00	1,00	1,08	2,08	1,00	0,50	0,50	1,00	1,50
3,00	0,50	0,50	1,33	1,00	6,50	0,25	2,00	2,00
3,00	0,42	1,00	1,00	1,50	1,17	1,50	1,00	1,00
1,08	2,33	0,50	0,50	1,17	1,00	0,50	2,50	
1,00	1,17	2,00	8,00	0,75	1,17	0,75	2,00	
0,67	3,00	1,83	7,00	0,67	1,50	3,00	1,00	
0,50	0,67	0,50	27,00	0,50	90,00	0,42	1,00	
0,33	2,50	3,00	1,00	0,83	1,25	0,83	1,50	

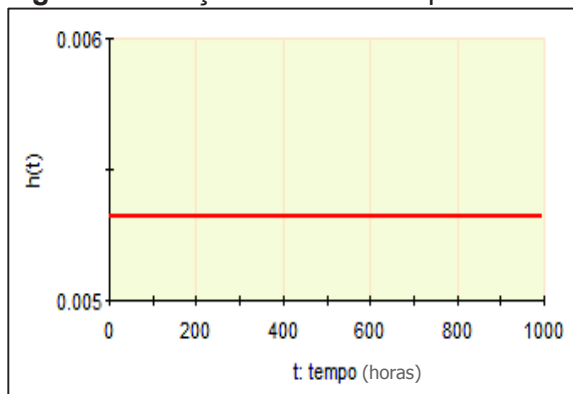
Fonte: Sistema de informação da empresa

Para os dados de TBF o *ProConf 2000* apresentou os resultados conforme Tabela 9. As distribuições de Weibull, exponencial e gama não podem ser rejeitadas. Pelas premissas da pesquisa, foi adotada a distribuição exponencial, com uma taxa de falha $\lambda = 0,0053$. A Figura 5 e 6 apresentam a curva da taxa de falha $h(t)$ e a curva $R(t)$ para o equipamento MS02.

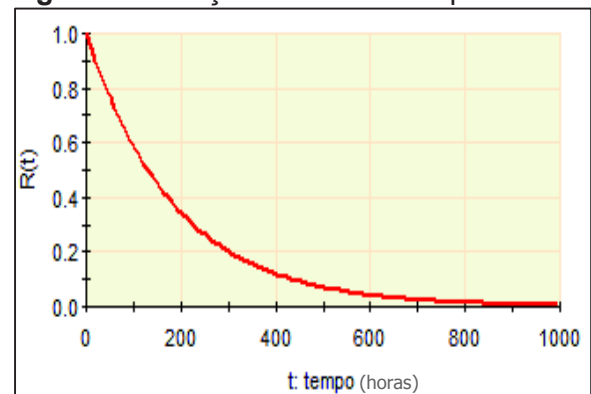
Tabela 9- Testes para TBF da MS02

Distribuição	MTBF	Dados Significativos	IC a 95%	Nível de Significância		Decisão
				χ^2	K-S	
Weibull	189,53	$\gamma = 0,847$	0,660 a 0,9725	79,21%	14,69%	Não Rejeitada
Exponencial	188,12	$\lambda = 0,0053$	0,004 a 0,0066	8,62%	19,13%	Não Rejeitada
Gamma	192,07	$\gamma = 0,735$	0,540 a 0,9766	94,59%	21,01%	Não Rejeitada
Normal						Rejeitada
Lognormal				25,03%	0,00%	Rejeitada

Fonte: Software *ProConf 2000*

Figura 5 - Função taxa de falha para MS02

Fonte: Software *ProConf 2000*

Figura 6 – Função confiabilidade para MS02

Fonte: Software *ProConf 2000*

Para os valores de TTR, o *ProConf 2000* apresentou os resultados da Tabela 10. Todos os testes foram rejeitados.

Tabela 10 – Testes para TTR da MS02

Distribuição	MTTR	Nível de Significância		Decisão
		χ^2	K-S	
Weibull	3,21	0,00%	0,00%	Rejeitada
Exponencial	2,72	0,00%	0,00%	Rejeitada
Gamma		0,00%	0,00%	Rejeitada
Normal	2,00	0,00%	0,00%	Rejeitada
Lognormal		0,00%	0,00%	Rejeitada

Fonte: Software *ProConf 2000*

O mesmo motivo de arredondamento dos dados de paradas do equipamento lançados no sistema de informação da empresa prejudicou análise dos dados. Para fins de cálculo de disponibilidade, o *MTTR* foi calculado através de média aritmética. Valor encontrado foi de 3,21 horas.

Aplicando os valores encontrados para *MTBF* e *MTTR* na equação (11), obtém-se o valor da disponibilidade $Av(t)$ para o equipamento MS02, conforme equação (27).

$$Av(t) = \frac{188,12}{(188,12+3,21)} = 98,32 \% \quad (27)$$

Pode-se dizer que o equipamento está parado por falha de origem mecânica ou elétrica em 1,67% do tempo. Em 98,32% do tempo em análise, o equipamento este disponível para produção.

4.3 Equipamento MS03

Os dados de TBF e TTR são mostrados nas Tabelas 11 e 12. Para os dados de TBF o *ProConf 2000* apresentou os resultados conforme Tabela 13. As distribuições de Weibull e lognormal não podem ser rejeitadas. Pelas premissas da pesquisa, foi adotada a distribuição de Weibull, um fator de forma $\gamma = 0,919$ e parâmetro de escala $\theta = 109,971$.

Tabela 11 – Histórico de dados (TBF)

TBF - Tempo entre falhas (horas)								
33,00	25,33	2,75	90,17	171,67	2,50	89,33	95,75	42,67
45,75	20,80	35,83	13,25	33,50	643,67	318,70	52,00	292,17
590,75	27,37	23,50	22,83	366,50	340,42	56,83	67,17	438,50
36,00	156,75	22,33	8,92	155,50	64,00	47,33	358,50	58,25
16,00	43,50	300,83	24,67	77,67	111,50	169,42	4,75	
108,67	39,50	26,00	148,75	17,83	13,00	227,75	131,67	
198,50	158,50	66,50	424,75	175,17	38,17	343,75	177,50	
166,83	85,33	131,75	47,00	36,17	3,67	263,83	56,83	
69,00	47,67	3,17	49,58	29,83	24,17	90,75	179,33	
13,75	150,00	30,83	3,17	75,83	44,67	3,25	264,50	
10,83	221,75	143,00	371,25	90,00	49,00	49,50	48,50	
24,83	9,58	40,08	31,50	111,17	200,75	208,00	107,00	

Fonte: Sistema de informação da empresa

Tabela 12 – Histórico de dados (TTR)

TTR - Tempo até o reparo (horas)								
2,00	0,33	0,50	1,42	3,00	0,50	0,67	1,25	0,17
1,50	0,50	0,25	1,58	4,33	2,17	1,30	1,00	1,00
0,50	0,33	0,67	0,67	1,00	0,58	1,17	0,50	1,50
2,50	2,00	2,00	0,75	0,25	1,50	0,67	1,83	3,50
4,00	0,75	1,33	0,17	3,58	1,50	0,58	1,25	1,08
6,00	4,50	1,00	3,17	0,83	1,50	1,50	1,00	
0,83	3,50	0,50	0,58	0,67	0,50	0,50	0,83	
1,00	0,33	0,25	0,75	0,33	2,67	1,17	1,00	
3,00	0,67	0,50	0,25	2,00	0,83	2,50	0,83	
0,42	0,67	0,33	1,50	0,83	2,00	1,00	1,50	
0,33	5,50	1,00	4,00	1,00	0,33	1,50	0,67	
1,33	0,17	1,17	0,75	6,00	4,25	1,00	0,83	

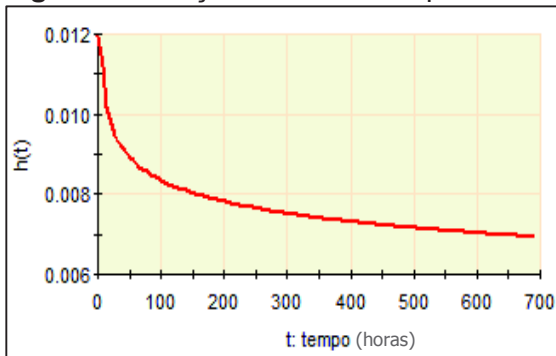
Fonte: Sistema de informação da empresa

Tabela 13- Testes para TBF da MS03

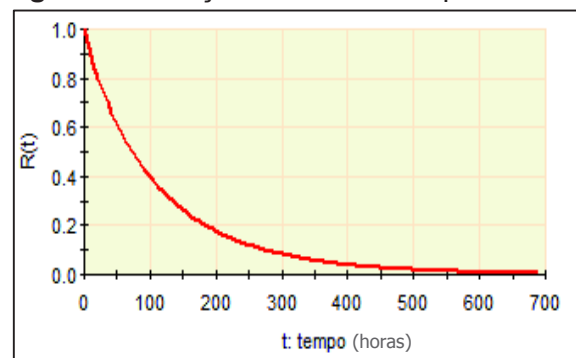
Distribuição	MTBF	Dados Significativos	IC a 95%	Nível de Significância		Decisão
				χ^2	K-S	
Weibull	114,66	$\gamma = 0,919$	0,7562 a 1,032	56,52%	8,68%	Não Rejeitada
Exponencial				30,01%	0,13%	Rejeitada
Gamma				47,79%	2,18%	Rejeitada
Normal				0,00%	0,00%	Rejeitada
Lognormal				135,095	33,62%	23,63%

Fonte: Software ProConf 2000

A Figura 7 e 8 apresentam a curva de taxa de falha $h(t)$ e a curva $R(t)$ para o equipamento MS03.

Figura 7 - Função taxa de falha para MS03

Fonte: Software ProConf 2000

Figura 8 – Função confiabilidade para MS03

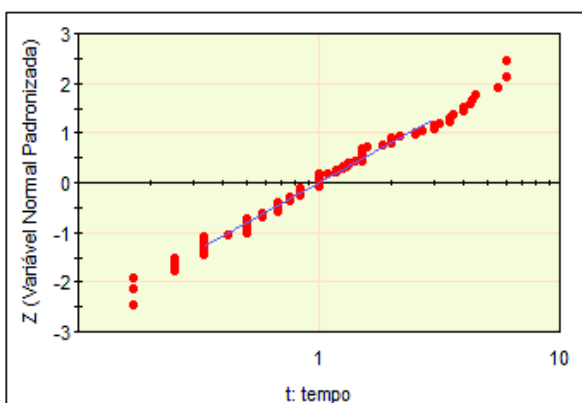
Fonte: Software ProConf 2000

Para os valores de TTR, o *ProConf 2000* apresentou os resultados da Tabela 14. A distribuição exponencial não pode ser rejeitada. O *MTTR* encontrado foi de 1,41 horas. O papel de probabilidade para a distribuição lognormal e manutenibilidade $M(t)$ são apresentados na Figura 9 e 10.

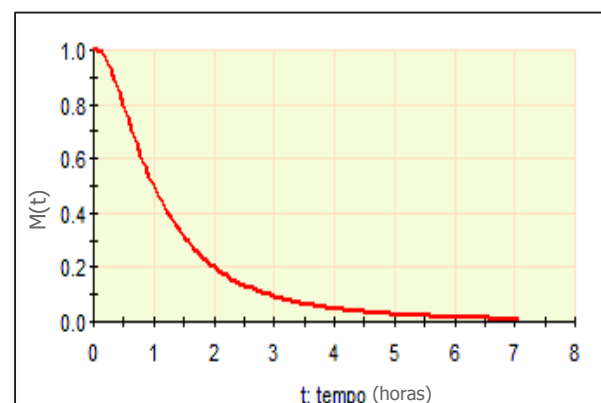
Tabela 10 – Testes para TTR da MS03

Distribuição	MTTR	Nível de Significância		Decisão
		χ^2	K-S	
Weibull	1,42	2,960%	0,00%	Rejeitada
Exponencial	1,41	4,36%	0,00%	Rejeitada
Gamma	1,42	2,94%	0,00%	Rejeitada
Normal	1,41	0,00%	0,00%	Rejeitada
Lognormal	1,41	26,71%	20,08%	Não Rejeitada

Fonte: Software ProConf 2000

Figura 9 – Papel de probabilidade para os TTR da MS03

Fonte: Software ProConf 2000

Figura 10 – Função manutenibilidade para a MS03

Fonte: Software ProConf 2000

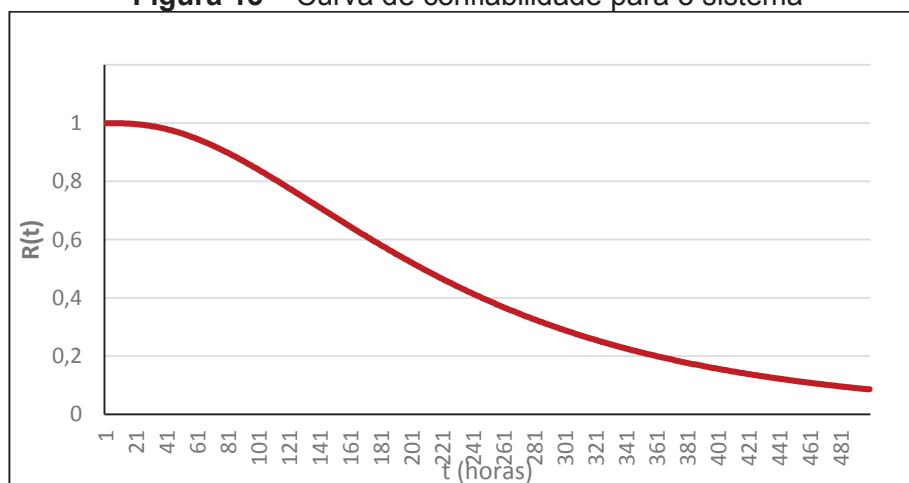
Aplicando os valores encontrados para *MTBF* e *MTTR* na equação (11), obtém-se o valor da disponibilidade $Av(t)$ para o equipamento MS01, conforme equação (28).

$$Av(t) = \frac{114,66}{(114,66+1,411)} = 98,78 \% \quad (28)$$

Pode-se dizer que o equipamento está parado por falha de origem mecânica ou elétrica em 1,21% do tempo. Em 98,78% do tempo em análise, o equipamento este disponível para produção.

Utilizando a equação (5) para cálculo da confiabilidade $R(t)$ para o sistema em paralelo, foi possível obter a curva de confiabilidade para um período de $0 < t < 500$ horas. A Figura 12 apresenta a curva $R(t)$ para o sistema formado pelas três máquinas.

Figura 13 – Curva de confiabilidade para o sistema



5 DISCUSSÃO

Utilizando os conceitos da RCM foi possível calcular a disponibilidade de cada um dos três equipamentos e identificar em qual fase do ciclo de vida cada um está na curva da banheira. Os resultados estão agrupados na Tabela 11.

A Figura 13 apresenta a provável posição dos três equipamentos na curva da banheira. Os resultados mostram que as máquinas possuem uma disponibilidade elevada, acima de 97%. Porém apenas a máquina MS02 está no período de maturidade, valor esperado para uma máquina com 18 anos de utilização. A melhor

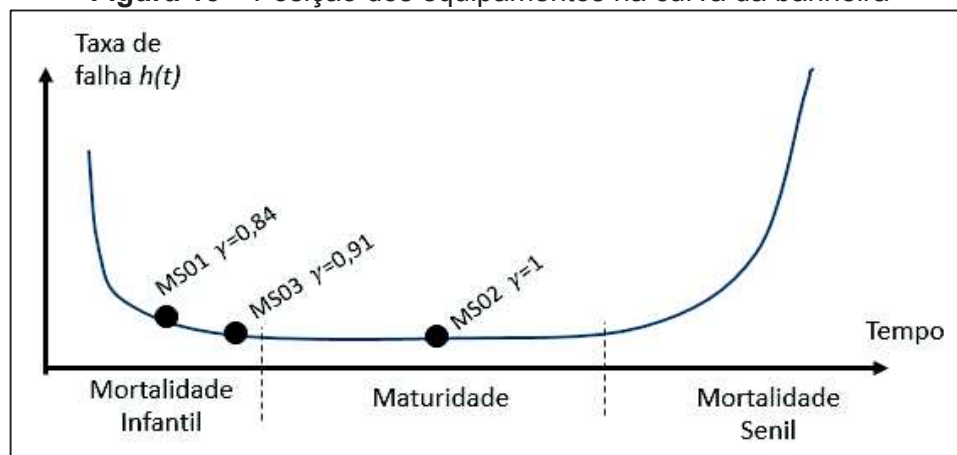
estratégia de manutenção para esse período é a manutenção preditiva, que consiste no monitoramento de falhas progressivas que resultarão em quebras. Tanto a MS01 e MS03 estão na fase de mortalidade infantil. Para esse período a estratégia de manutenção indicada é a manutenção corretiva que tem como objetivo eliminar erros de projeto e/ou instalação do equipamento (SELLITO, 2005).

Tabela 11 – Síntese dos 3 equipamentos

	MS01	MS02	MS03
MTBF (horas)	107,74	188,12	114,66
Distribuição para TBF	Weibull	Exponencial	Weibull
MTTR (horas)	2,3	3,21	1,41
Distribuição para TTR	-	-	Lognormal
Curva da Banheira	Mortalidade Infantil	Maturidade	Mortalidade Infantil
Disponibilidade $Av(t)$	97,90%	98,32%	98,78%

Fonte: Software ProConf 2000

Figura 13 – Posição dos equipamentos na curva da banheira



Dois fatores importantes devem ser analisados: (i) por mais que as três máquinas tenham as mesmas características técnicas, desde o início das operações da fábrica, a MS01 e MS03 trabalharam produzindo vergalhões dos diâmetros 12,5 a 16mm, aproximadamente 85% de programação delas, enquanto que a MS02 trabalhou 100% do tempo com o vergalhão de diâmetro de 10mm. Essa diferença de programação por um período grande pode acarretar maior desgaste dos componentes, ocasionando maiores falhas; e (ii) em março de 2014, ocorreu uma adequação dos equipamentos no sistema de segurança NR12, porém a solução instalada para MS01 e MS03 são diferentes da solução instalada na MS02.

A empresa adota como estratégia de manutenção a manutenção preventiva, na qual consiste na substituição de componentes de maneira preventiva conforme *check list* elaborado pela engenharia de manutenção. Essa estratégia adotada pode acarretar aumento de custos com sobressalentes, pois pode substituir um componente prematuramente, e nessa substituição pode ocorrer o risco de inserir componentes com defeitos e criar problemas onde não existia.

Conforme revisão bibliográfica desse trabalho, a escolha da estratégia de manutenção deve ser definida conforme o período que o equipamento se encontra no ciclo de vida (curva da banheira). Segundo Sellitto (2005), adotar a estratégia de manutenção preventiva para as três máquinas em análise podem acarretar para a MS02 o retorno do equipamento para mortalidade infantil ao trocar sobressalente que não apresentam falhas de origem e ainda não iniciaram o desgaste. E para máquinas MS01 e MS03 essa estratégia pode prolongar ou perpetuar a mortalidade infantil ao trocar exatamente os componentes que não apresentaram falhas de origem, itens robustos.

Com base nos dados de falhas coletados no sistema de informação da empresa, foi possível verificar que para os equipamentos MS01 e MS03 a principal parada é por falha no sistema de segurança NR12. Como esse sistema foi instalado recentemente, março de 2014, essa frequência de falha caracteriza um erro de projeto ou instalação. Assim, recomenda-se que para esses dois equipamentos a engenharia de manutenção faça uma análise mais detalhada dessas paradas, como por exemplo analisar os TBF e TTR dos subsistemas, para que atue na correção dessas falhas. Dessa maneira, as taxas de falhas possam reduzir fazendo com que o equipamento evolua para a fase de maturidade. Para o equipamento MS02, recomenda-se fazer a mesma análise dos TBF e TTR das falhas de cada subsistema e a elaboração de inspeções periódicas desses subsistemas conforme suas taxas de falhas.

Conclui-se que a utilização da metodologia da RCM (Reliability Centered Maintenance – Manutenção Centrada na confiabilidade) pode resultar na escolha correta da estratégia de manutenção, aumentando a confiabilidade dos equipamentos e reduzindo custos. Porém para isso, é necessário ter uma engenharia de manutenção focada na análise dos dados de falhas periodicamente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Objetivo desse trabalho foi definir a estratégia de manutenção para os três equipamentos que consiste um sistema em paralelo instalados em uma fábrica de transformação mecânica de vergalhões. Através dos dados de paradas existente no sistema de informação da empresa, foi possível posicionar em qual fase do ciclo de vida cada equipamento encontra-se e definir a estratégia de manutenção mais indicada. O método utilizado foi a modelagem quantitativa.

Os objetivos secundários foram modelar as funções de confiabilidade e manutenibilidade e calcular a disponibilidade $Av(t)$ para cada equipamento. Porém devidos ao arredondamento dos tempos de reparo lançados pelos técnicos da manutenção, não foi possível definir a curva de mantebanilidade para dois dos equipamentos. Nota-se a importância de um sistema de informação confiável, pois através desses dados que os gestores de manutenção podem definir a estratégia de manutenção que será aplicada em suas plantas.

Para possível continuidade de pesquisa, sugere-se a análise quantitativa e qualitativa dos dados de falha dos subsistemas de cada equipamento estudado nesse trabalho, com o objetivo de correção de falhas de projeto para que o equipamento evolua para fase de maturidade. Também pode ser realizado a elaboração de plano de inspeções periódicas conforme a taxa de falhas de cada subsistema para execução da estratégia de manutenção preditiva.

REFERÊNCIAS

CORRÊA, H. CORRÊA, C. **Administração de produção e o operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. São Paulo: Atlas, 2010.

FILHO, O; SELLITTO, M. **Cálculo da disponibilidade e posição no ciclo de vida de três linhas de produção de uma empresa da indústria qupimica**. *Engevista*,v. 16, n. 4, p. 414-430, 2014.

FOGLIATTO, F.;RIBEIRO,J. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FRITSCH, C e RIBEIRO, J. **PROCONF: Um software orientado para análise de confiabilidade**. In. XVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Niterói, 1998.

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

LEWIS, E. **Introduction to reliability engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1996.

MACCHI, M.; GARETTI, M.; CENTRONE, D.; FUMAGALLI, L.; PVIRANI, G. **Maintenance management of railway infrastructures based on reliability analysis**. Reliability Engineering & Systems Safety, v.104, n.1, p.71-83, 2012.

MENDES, A. **Manutenção centrada em confiabilidade: uma abordagem quantitativa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), UFRGS, 2011.

MENGUE, D.; SELLITTO, M. **Estratégia de manutenção baseada em funções de confiabilidade para uma bomba centrífuga petrolífera**. Produção Online, v13, n.2, p. 756-783, 2013.

MONCHY, F. **A função Manutenção: formação para gerência da manutenção industrial**. São Paulo: Durban/EBRAS, 1989.

NAKANO, D. **Métodos de pesquisa adotados na engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Campus, 2010.

SELLITTO, M. **Análise estratégica da manutenção de uma linha de fabricação baseada em cálculos de confiabilidade de equipamentos**, GEPROS, v.2, n.1, p.97-108, 2007.

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

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, 2002.

SIQUEIRA, I. **Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implementação**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.