Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC): Análise Quantitativa de uma Máquina de Trefilar

Matheus Schmitz (UNISINOS)
Matheus10schmitz@gmail.com
Marcos Leandro Hoffmann de Souza (UNISINOS)
mlhoffmann@unisinos.br

Resumo: *O objetivo deste artigo é definir a estratégia de manutenção mais adequada para uma máquina de trefilar. O método utilizado foi a modelagem quantitativa, através da metodologia da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC). A estratégia de manutenção da máquina foi definida com base em análises de sua confiabilidade, disponibilidade e mantenabilidade. Estas análises foram realizadas com base em dados históricos de tempo até o reparo (TTR) e tempo até a falha (TTF) do equipamento, que foram obtidos do sistema de informação da empresa. Com o auxílio do software ProConf 2000, foram definidas as distribuições estatísticas mais adequadas para os dados, embasando a modelagem quantitativa e estudo destes. Com os resultados obtidos pelas modelagens foi possível calcular a disponibilidade do equipamento (97.06%), e o parâmetro de forma (γ=1.1729). Conforme a metodologia utilizada, o equipamento foi posicionado na curva da banheira, se encontrando na fase de mortalidade senil. Esta informação foi utilizada para definir, com base na literatura, a estratégia de manutenção indicada para este caso, a preventiva. Por fim, comparou-se a estratégia adotada atualmente pela empresa com a estratégia proposta pela literatura.*

Palavras Chave: Manutenção, MCC, Confiabilidade, Disponibilidade, Mantenabilidade.

1. Introdução

Tradicionalmente o papel da manutenção, juntamente as atividades, recursos, métricas e gestão a ela relacionadas, tem sido importante para as organizações industriais. Porém, a necessidade de um gerenciamento efetivo das diversas facetas da manutenção tem crescido em importância devido à evolução das tecnologias operacionais que elevaram o papel que a manutenção desempenha na estratégia da organização. (SIMÕES et al., 2010). Cada vez mais a manutenção desempenha um papel significativo na produtividade e consequentemente na lucratividade de industrias manufatureiras. Uma estratégia de manutenção organizada e propriamente gerenciada é capaz de grande influência nos comportamentos técnicos do sistema, como sua confiabilidade e segurança, consequentemente resultando em maiores tempos de vida dos componentes e melhorando sua disponibilidade. (DEHGHANIAN et al., 2012).

A crescente busca por eficiência global tem levado um número cada vez maior de empresas a elevar sua consideração estratégica quanto às atividades de manutenção. A manutenção efetiva é crítica para diversas operações, ela estende o tempo de vida dos equipamentos, eleva sua disponibilidade e evita que ocorram problemas

de produto decorrentes de defeitos de maquinário. (SWANSON, 2001). Tornou-se evidente que uma estratégia de manutenção eficiente e eficaz é crucial para manter baixos os custos de produção e para garantir entregas dentro do prazo. Assim, muitas organizações reconheceram que a manutenção de seus ativos e maquinários é uma parte essencial de sua função operacional e que uma estratégia de manutenção pode contribuir significativamente à lucratividade da empresa ao auxiliar em otimizar as atividades produtivas. (NIKOLOPOULOS et al., 2003).

Uma estratégia de manutenção robusta, capaz de entregar todos os possíveis benefícios já citados, deve ser baseada em métodos quantitativos, que possibilitem uma análise objetiva do equipamento em estudo. Métodos quantitativos apurados fazem estimativas com base em dados históricos, permitindo uma compreensão objetiva da confiabilidade do equipamento. A manutenção centrada em confiabilidade (MCC) é um dos métodos quantitativos que tem sido aplicados com sucesso a vários segmentos industriais. (SELITTO, 2007; MENGUE e SELLITO, 2013; CERVEIRA e SELLITO, 2015).

A MCC é um método sistemático que visa propor o tipo ideal de manutenção a ser realizada em um equipamento com base nas características de falhas do mesmo, mantendo assim o equilíbrio ótimo entre manutenção preventiva e corretiva. Este método define as atividades de manutenção mais eficiente em termos de custo, performance e disponibilidade. Assim, a MCC é uma técnica utilizada para desenvolver planos de manutenção que minimizem os custos ao mesmo tempo que atendam a critérios estabelecidos para que a capacidade operacional de equipamentos seja obtida, recuperada ou mantida. Seu principal objetivo é a redução dos custos associados as atividades de manutenção através de um foco nas funções mais críticas ao sistema. (YSSAAD, 2014).

O objetivo deste artigo é identificar, através da MCC e de dados históricos, a estratégia de manutenção mais adequada para uma máquina de trefilar. A máquina utilizada para a coleta de dados e análise foi uma trefiladeira modelo Mario Frigerio 11 usada na trefilação de fios e arames.

2. Revisão Bibliográfica

A seguir são apresentadas as contribuições teóricas da literatura, as quais dão suporte ao presente estudo.

2.1 Funções de confiabilidade

Segundo Brand (2011) uma análise completa da confiabilidade de um equipamento requer dados acerca de quatro funções de confiabilidade, são elas: função densidade de falhas *f(t)*, função acumulada de falhas *F(t)*, função de risco *h(t)* e função confiabilidade *R(t)*.

A função densidade de falhas *f(t)* representa a variação da probabilidade de falhas por unidade de tempo. É representada por uma função distribuição de probabilidade.

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

A função acumulada de falhas *F(t)* representa a probabilidade de falha de uma unidade em uma missão de duração igual a *t*.

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

A função de confiabilidade *R(t)* informa a probabilidade de uma unidade apresentar sucesso na operação no intervalo de tempo [*0,t*] e ainda estar operando no tempo *t*.

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

A função de risco *h(t)* é a probabilidade de falha por unidade de tempo uma vez que o componente tenha operado até o instante *t*.

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

2.2 Distribuições de probabilidade

As falhas ocasionadas à equipamentos costumam se assimilar a certas distribuições de probabilidades conhecidas, e a determinação de qual distribuição melhor se adequa a cada objeto de estudo é uma etapa essencial para o desenvolvimento de uma estratégia de manutenção centrada em confiabilidade. Existem quatro distribuições probabilísticas que são de especial de interesse para a manutenção: exponencial, Weibull, gamma e lognormal. (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

A distribuição exponencial replica uma taxa de falhas constante, sendo ideal para analisar falhas em sistemas complexos não redundantes ou com taxas de falhas que são independentes umas das outras. A distribuição exponencial se adequa também a sistemas cujas causas de falhas sejam heterogêneas ou ainda a sistemas com um grande número de componentes, cujas substituições são realizadas antes de suas falhas. (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009). As equações a seguir apresentam as funções de interesse para a distribuição exponencial.

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

$$h(t) = \lambda$$

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

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

Em que:

λ = parâmetro da distribuição exponencial;

t = tempo até a falha.

A distribuição Weibull está entre as mais importantes para estudos de confiabilidade pois é altamente flexível, sendo capaz de modelar diferentes comportamentos que a função de risco pode assumir, dependendo do valor que possui o parâmetro de forma, de modo que: se $\gamma < 1$, então $h(t)$ é decrescente; se $\gamma = 1$, então $h(t)$ é constante; e se $\gamma > 1$, então $h(t)$ é crescente. Por modelar falhas de equipamentos sujeitos a modos de falha em série, a distribuição Weibull é ideal para simular o comportamento de sistemas cuja falha é decorrente da competição entre diversos modos de falha, de modo que a primeira falha a ocorrer torna o equipamento inutilizável. (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009). As equações abaixo apresentam as funções de interesse para a distribuição Weibull.

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-(\frac{t}{\theta})^{\gamma}}$$

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

$$R(t) = e^{-(\frac{t}{\theta})^{\gamma}}$$

$$MTTF = \theta\Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)$$

Em que:

γ = parâmetro de forma;

θ = parâmetro de escala;

Γ = função gamma;

t = tempo até a falha.

A distribuição gamma representa uma versão generalizada da distribuição exponencial que descreve sistemas que operam em paralelo, ou seja, sistemas que só irão falhar uma vez que todos seus componentes tenham falhado,

como é o caso de sistemas com redundâncias. (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009). As equações abaixo apresentam as funções de interesse para a distribuição gamma.

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

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

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

$$MTTF = \frac{\gamma}{\lambda}$$

Em que:

λ = parâmetro da distribuição exponencial;

γ = parâmetro de forma;

Γ = função gamma;

t = tempo até a falha.

A distribuição lognormal frequentemente é a melhor para a modelagem de componentes que naturalmente sofram desgastes em decorrência de sua utilização, como por exemplo peças metálicas suscetíveis a falhas em decorrência de fadiga, trincas ou corrosão de seus componentes. (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009). As equações abaixo apresentam as funções de interesse para a distribuição lognormal.

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

$$h(t) = \frac{\Phi\left[\mu - \frac{\ln(t)}{\sigma}\right]/\sigma t}{\Phi\left[\mu - \frac{\ln(t)}{\sigma}\right]}$$

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

$$MTTF = e^{(\mu+\sigma^2)/2}$$

Em que:

Φ = valor da função da distribuição normal padronizada;

μ = média do logaritmo dos dados;

σ = desvio padrão da distribuição lognormal;

t = tempo até a falha.

Alternativamente, a confiabilidade de que o equipamento esteja funcionando até um dado ponto no tempo também pode ser calculada, através da fórmula abaixo. (NIST e SEMATECH, 2013).

$$R(t) = 1 - \Phi(\frac{ln(t) - \mu}{\sigma})$$

Onde a distribuição normal cumulativa padrão (*normsdist*) determina a probabilidade de falha até um tempo (t), de modo que a distribuição normal cumulativa do valor obtido através da equação $(\frac{ln(t)-\mu}{\sigma})$ é equivalente a $\Phi(\frac{ln(t)-\mu}{\sigma})$, podendo ser matematicamente apresentada como:

$$\Phi(\frac{ln(t) - \mu}{\sigma}) = normsdist\,(\frac{ln(t) - \mu}{\sigma})$$

Obtém-se então que:

$$R(t) = 1 - normsdist(\frac{\boldsymbol{ln(t) - \mu}}{\boldsymbol{\sigma}})$$

2.3 Mantenabilidade

A mantenabilidade é definida pela norma NBR 5462 como a "capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos". (ABNT, 1994).

Mantenabilidade (*M*) pode ser entendida como a probabilidade de que a máquina seja reparada até um período de tempo especificado após sua falha. A mantenabilidade pode ser obtida por meio do cálculo da confiabilidade (*R*) dos dados de tempo até o reparo, de modo de uma confiabilidade de 1, ou 100%, indica que com certeza a máquina ainda está em reparo. Ou seja, para um dado ponto no tempo, a confiabilidade (*R*) do tempo até o reparo indica qual a probabilidade de que o componente em questão ainda esteja em reparo. Consequentemente, quanto menor foi o tempo até o reparo, melhor será a mantenabilidade do equipamento e maior será sua disponibilidade.

2.4 Disponibilidade

A disponibilidade representa o percentual de tempo de trabalho no qual um item está em condição operacional, podendo ser calculada por meio da equação abaixo. (LAFRAIA, 2001).

$$Disponibilidade = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Deste modo, como já implícito na equação, quando o tempo entre falhas aumenta, aumenta também a disponibilidade, enquanto que, quando o tempo entre reparos aumenta, a disponibilidade é reduzida.

De modo qualitativo a equação proposta por Lafraia (2001) é importante para a definição da estratégia de manutenção, pois existem duas maneiras de se influenciar a disponibilidade dos equipamentos, de modo que devam ser considerados os méritos e efeitos de ações de melhoria em ambas as frentes de atuação, a de redução dos tempos de reparo, e a de redução da frequência de paradas.

2.5 Taxa de falhas e estratégia de manutenção

Uma etapa essencial para a definição da estratégia de manutenção é o posicionamento da máquina na curva da banheira, um gráfico que representa as fases da vida características de um equipamento: mortalidade infantil, maturidade e mortalidade senil. As fases estão associadas ao fator de forma γ (SELLITTO, 2005). Um fator de forma $\gamma < 1$, indica que o item estudado está na fase de mortalidade infantil, na qual as falhas estão geralmente relacionadas à erros de projeto, fabricação e operação; e são causadas por defeitos ou fraquezas congênitas, peças defeituosas, processos de fabricação inadequados entre outras. Um fator de forma $\gamma = 1$ indica um equipamento no período de maturidade, no qual as falhas ocorrem geralmente de maneira aleatória, são de difícil controle e podem ser de vários tipos: sobrecargas aleatórias, impactos mecânicos, variações bruscas de temperatura, erros humanos. Por fim, $\gamma > 1$ caracteriza a fase de mortalidade senil, na qual as falhas ocorrem em função da própria idade dos componentes do equipamento apontada também pela redução expressiva do MTBF, neste período a taxa de falha aumenta exponencialmente.

O software utilizado calcula o parâmetro de forma (γ) apenas para as distribuições exponencial, Weibull e gamma, ainda assim o parâmetro de forma (γ) pode ser estimado para a distribuição lognormal através da equação apresentada abaixo. (NIST e SEMATECH, 2012).

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(ln\ (X_i) - \hat{\mu})^2}{N}}$$

Para a qual o parâmetro $\hat{\mu}$ pode ser obtido através da equação:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^{N} ln\ (X_i)}{N}$$

Nestas equações a variável X_i representa valores de tempo entre falhas (TBF), e *N* é a quantidade de inputs X_i.

3. Procedimentos metodológicos

O método a ser utilizado na pesquisa foi a modelagem quantitativa. Modelagem envolve o emprego de técnicas matemáticas para representar o comportamento de um objeto de interesse (NAKANO, 2010; MIGUEL, 2007). Caso seja factível delinear o comportamento de um objeto de estudo por um modelo matemático, também é admissível extrair conclusões a seu respeito. O estudo balizou à análise quantitativa por modelagem de duas variáveis aleatórias: tempo entre falhas e tempo até o reparo. Martins (2010) aponta modelagem como um dos quatro métodos aplicáveis em pesquisas quantitativas em Engenharia de Produção.

O método de trabalho utilizado para o desenvolvimento deste trabalho consiste das seguintes etapas.

a) Revisão da literatura, incluindo os conceitos de manutenção, confiabilidade, mantenabilidade, disponibilidade, curva da banheira e estratégia de manutenção;
b) Definição e delimitação dos objetivos do estudo;
c) Coleta dos dados de tempos até a falha e tempos até o reparo do equipamento estudado;
d) Análise dos dados através de modelagens utilizando o software ProConf 2000;
e) Posicionamento do equipamento na curva da banheira com base nos resultados das análises;
f) Cálculo da confiabilidade, mantenabilidade e disponibilidade esperados do equipamento
g) Definição da estratégia de manutenção;
h) Discussão dos resultados.

4. Coleta e análise de dados

4.1. Coleta de dados

A análise de confiabilidade de uma máquina requer necessariamente dados passados sobre tal máquina, como o tempo até o reparo (TTR) e o tempo entre falhas (TBF). Para a análise descrita neste artigo, ambos os dados de tempo até o reparo e tempo até a falha (TTF) foram obtidos do software de gestão da empresa.

Na posse dos dados de tempo até a falha e tempo até o reparo, o tempo entre falhas pode ser calculado pela simples adição de ambos, conforme explicitado na equação abaixo:

$$TBF = TTF + TTR$$

Os dados utilizados na análise através do software ProConf 2000 (Versão Estudante) cobrem o período de janeiro a maio de 2017, totalizando 100 outputs do sistema. Ressalta-se que a empresa trabalha 24 horas por dia, 7 dias por semana, de modo que os dados podem ser analisados de maneira corrida. A unidade de tempo utilizada para o estudo é em minutos.

As tabelas 1 e 2 a seguir contêm os dados nos quais a análise da confiabilidade se baseou. Embora os dados de tempo entre falhas tenham sido calculados indiretamente, como estes foram os dados utilizados na análise, eles são apresentados no lugar dos dados de tempo até a falha que não são utilizados neste estudo.

Tabela 1 - Tempo até o reparo

TTR - Tempo até o reparo (minutos)									
109	25	56	63	63	33	53	51	82	34
115	59	152	57	82	44	52	276	125	33
104	77	126	110	49	17	57	84	28	92
16	73	108	21	60	69	50	69	48	119
44	78	20	72	48	15	45	27	11	43
46	30	25	37	66	23	33	50	117	74
93	92	44	75	90	71	25	20	33	141
213	325	744	16	104	71	231	62	47	129
251	92	55	29	10	72	52	117	5	156
319	43	101	38	121	59	37	9	50	64

Fonte: Sistema de informação da empresa

Tabela 2 - Tempo entre falhas

TBF - Tempo entre falhas (minutos)									
1075	3178	11968	1092	944	7171	8641	1479	652	395
4372	351	3652	1471	2125	1436	1455	1899	1673	404
3160	753	1082	5782	893	1415	1746	13432	237	489
748	3304	1147	1443	3465	1503	669	4293	261	555
785	10320	1446	5685	582	1460	684	6995	229	1031
812	239	9505	1340	625	69	679	228	343	3146
947	357	945	2221	2835	134	693	216	350	693
1108	3107	17869	763	1451	2066	908	2890	367	5032
4789	3258	2084	778	1458	652	1571	1621	363	14416
18312	4384	904	836	193	1969	1440	265	409	20162

Fonte: Sistema de informação da empresa

4.2. Analise dos modelos probabilísticos no ProConf

4.2.1. Tempo até o reparo (TTR)

Para a definição do modelo probabilístico a ser utilizado nas análises de mantenabilidade da máquina de trefilação foram aplicados os testes de Qui-Quadrado (χ^2) e Kolmogorov-Smirnov (KS), que indicam quão bem diversos modelos paramétricos se adequam aos dados. Para que não se rejeite a hipótese de que a distribuição probabilística de adequa aos dados, com uma confiança de 95%, sua significância deverá ser maior que 5% no teste de Kolmogorov-Smirnov (KS).

As distribuições probabilísticas analisadas foram: Exponencial, Weibull, Gamma, Lognormal e Normal. Os resultados dos testes para cada distribuição, assim como as decisões tomadas com bases nestes testes são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 - Nível de significância aos modelos de distribuição - TTR

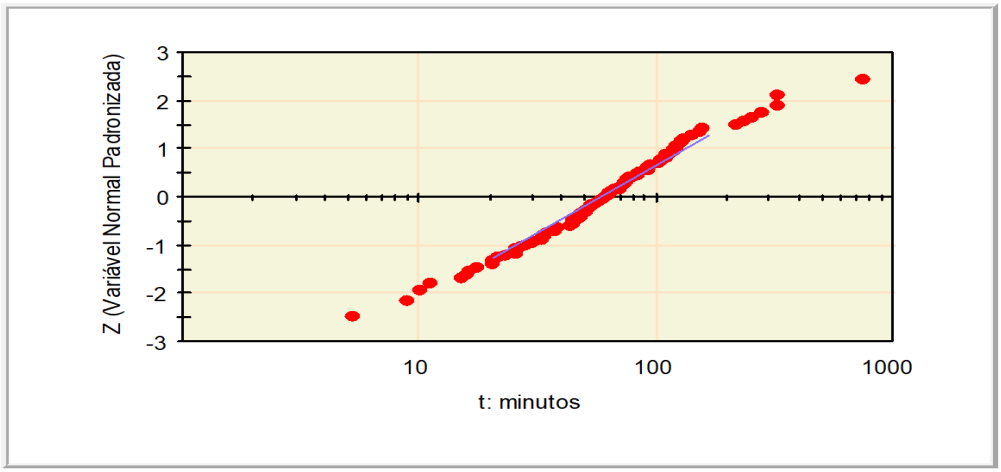
Distribuição	Teste χ^2	Teste KS	Decisão
Exponencial	0.01%	0.01%	Rejeitada
Weibull	0.01%	0.91%	Rejeitada
Gamma	90.03%	1.82%	Rejeitada
Lognormal	4.17%	9.60%	Não Rejeitada
Normal	0.01%	0.01%	Rejeitada

Fonte: Elaborado pelos autores

Como pode ser observado na tabela acima, a única hipótese de adequação que não pode ser rejeitada é a da distribuição lognormal, consequentemente esta é a distribuição utilizada para as análises dos dados de tempo até o reparo.

A adequação do modelo aos dados pode também ser observada de maneira visual através do gráfico 1, o qual representa o papel de probabilidade, que demonstra o quão bem a equação estimada pela distribuição se adequa aos dados nos quais esta é baseada.

Gráfico 1 - Papel de probabilidade lognormal para o TTR



Fonte: Elaborado pelos autores

A análise visual do gráfico parece indicar que o modelo utilizado possui boa adequação aos dados. Os parâmetros da equação obtidos pelo papel de probabilidade são:

- Média (μ) = 4,06
- Desvio Padrão (σ) = 0,82

Utilizando o ProConf podem também ser obtidos outros parâmetros relevantes a distribuição utilizada. Estes parâmetros são t10 e t50, que indicam, respectivamente, os tempos estimados para que 10% e 50% dos reparos ocorram, o MTTR, que é o tempo médio até o reparo, e por último o intervalo de confiança de 95% (IC 95%), que indica a faixa de tempo estimada para 95% dos reparos. Estes dados são apresentados na tabela 4.

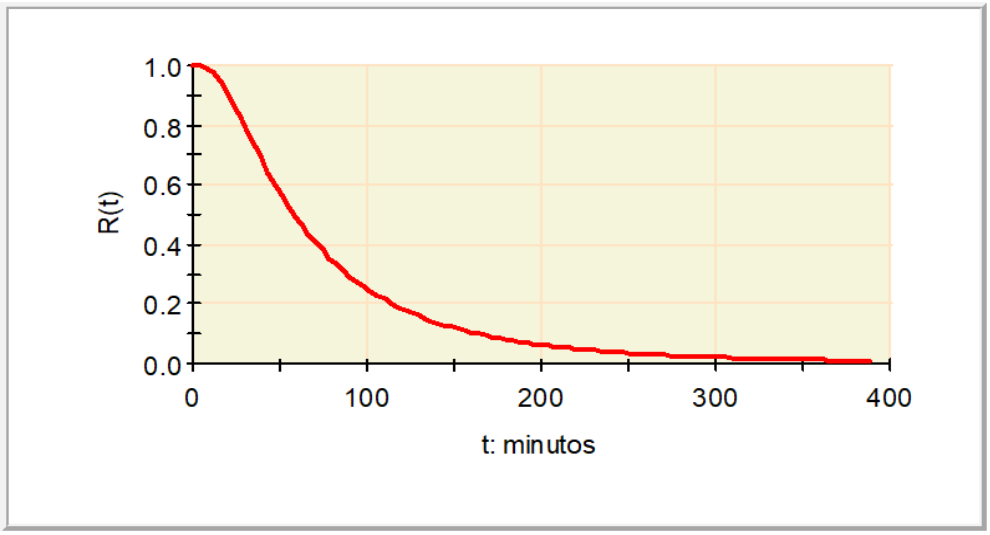
Tabela 4 - Modelo lognormal para o TTR

Parâmetro	**Resultado**
t_{10}	20.7
t_{50}	58.17
MTTR	80.5
IC 95%	68.04 - 95.88

Fonte: Elaborado pelos autores

A última análise executada para os dados de tempo até o reparo é em relação a mantenabilidade esperada a partir dos dados obtidos. A mantenabilidade (M) da máquina de trefilar analisada está representada no gráfico 2 por meio da confiabilidade do TTR, conforme a abordagem apresentada no item 2.3 do artigo.

Gráfico 2 - Função de mantenabilidade *M(t)*



Fonte: Elaborado pelos autores

4.2.2. Tempo entre falhas (TBF)

Os mesmos testes de hipótese descritos acima para a variável de tempo até o reparo foram aplicados para o tempo entre falhas, com o objetivo de definir qual a distribuição probabilística a ser utilizada para o cálculo da confiabilidade da máquina.

Dentre todas as distribuições analisadas a única que não foi rejeitada é a da adequação do modelo lognormal, portanto este será o modelo utilizado nas análises. Os resultados dos testes para cada distribuição, assim como as decisões tomadas com bases nestes testes são apresentadas na tabela abaixo.

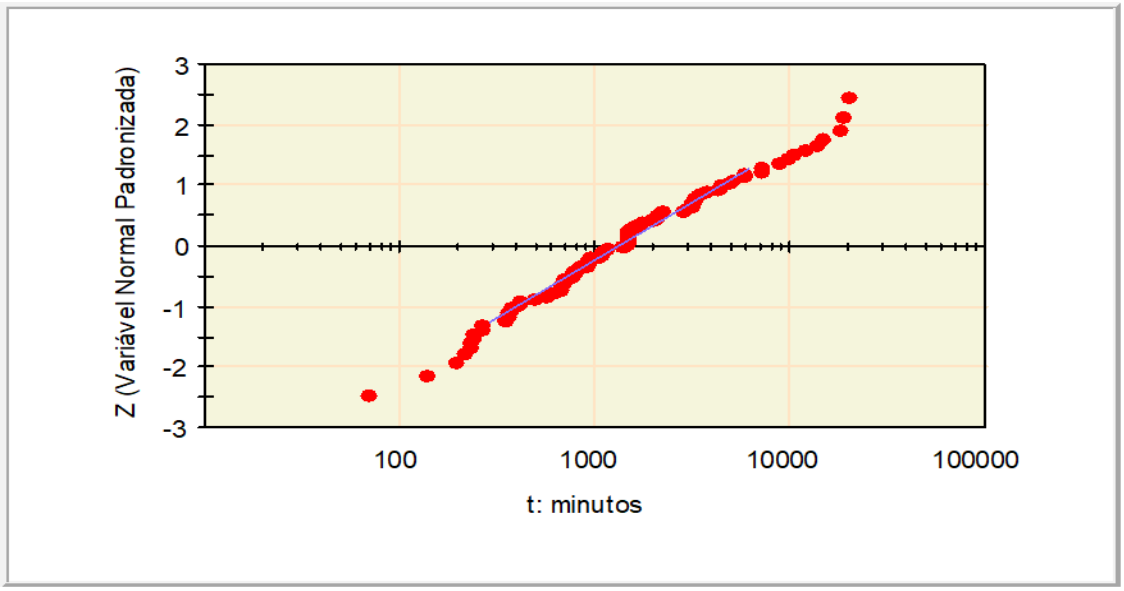
Tabela 5 - Nível de significância do ajuste aos modelos de distribuição - TBF

Distribuição	Teste χ^2	Teste KS	Decisão
Exponencial	0.01%	0.01%	Rejeitada
Weibull	0.30%	0.03%	Rejeitada
Gamma	0.01%	0.01%	Rejeitada
Lognormal	8.23%	11.25%	Não Rejeitada
Normal	0.01%	0.01%	Rejeitada

Fonte: Elaborado pelos autores

Complementarmente é utilizado o papel de probabilidade apresentado no gráfico 3 da adequação da distribuição lognormal aos inputs utilizados.

Gráfico 3 - Papel de probabilidade lognormal para o TBF



Fonte: Elaborado pelos autores

O gráfico parece indicar boa adequação da distribuição lognormal para os dados utilizados. Os parâmetros da equação obtidos pelo papel de probabilidade são:

- Média (μ) = 7.20
- Desvio Padrão (σ) = 1.19

Os parâmetros adicionais explanados no item acima foram também obtidos para os dados de tempo entre falhas e são apresentados na tabela 6.

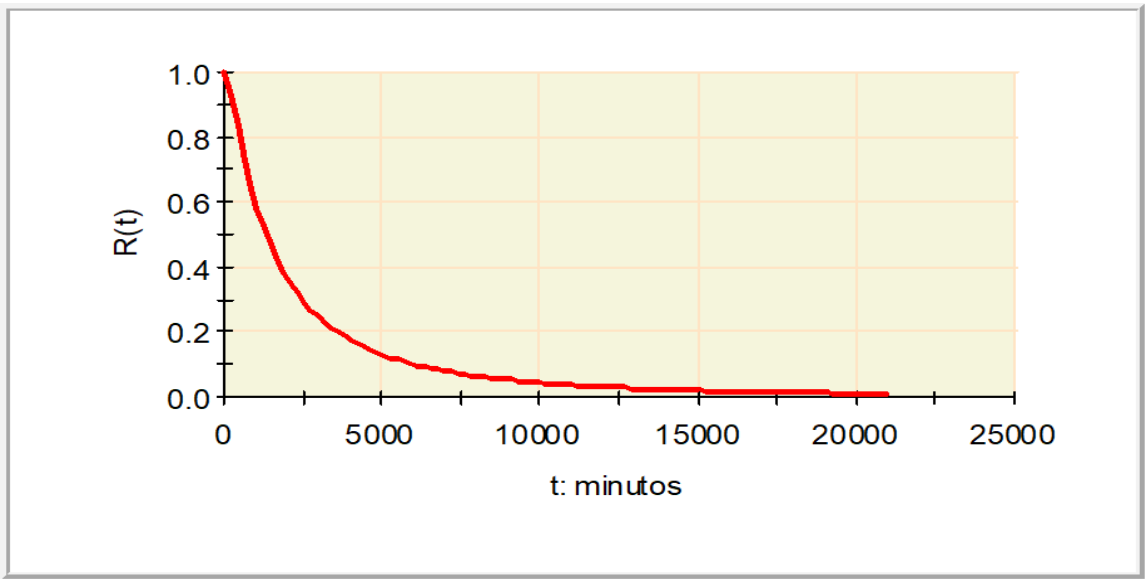
Tabela 6 - Modelo lognormal para o TBF

Parâmetro	Resultado
t_{10}	297.07
t_{50}	1335.76
MTBF	2657.92
IC 95%	2045.55 - 3500.27

Fonte: Elaborado pelos autores

A confiabilidade da máquina de trefilar em questão, que é um dos objetivos deste trabalho, pode ser visualizada no gráfico 4 a partir dos dados de tempo entre falhas, o que permite uma análise visual do comportamento desta, complementando os dados da tabela 6.

Gráfico 4 - Função confiabilidade *R(t)*



Fonte: Elaborado pelos autores

Utilizando os dados descritos nesta seção, no item abaixo são calculadas as disponibilidade e confiabilidade do equipamento analisado.

4.3. Análise da confiabilidade e disponibilidade

Conforme descrito na revisão da literatura, uma vez que se possuam os dados de tempo médio entre falhas (MTBF) e tempo médio até o reparo (MTTR), a disponibilidade de um equipamento pode ser calculada através da equação apresentada abaixo.

$$Disponibilidade = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{2657.92}{2657.92 + 80.5} = 97.06\%$$

Para a máquina analisada neste trabalho, obteve-se uma disponibilidade de 97.06%, ou seja, durante 97.06% do tempo compreendido neste estudo a máquina de trefilar estava disponível para operação.

Utilizando a equação alternativa para a distribuição lognormal, é possível estimar a confiabilidade (*R*), da máquina de trefilar em análise. Sabendo que os 100 dados de falhas utilizados neste estudo foram obtidos num período de apenas 136 dias, já existem indícios que a máquina falhe próximo de uma vez por dia. Partindo desta suposição, abaixo são apresentadas as confiabilidades para um dia, medido em minutos *R(1440)* e para uma semana, também em minutos *R(10080).*

$$normsdist\left(\frac{ln(1440) - 7.2}{1.19}\right) = normsdist\,(0.06084) = 0.5243$$

$$R(1440) = 1 - \ 0.5243 = 47.57\%$$

$$normsdist\left(\frac{ln(10080) - 7.2}{1.19}\right) = normsdist\,(1.6961) = 0.9551$$

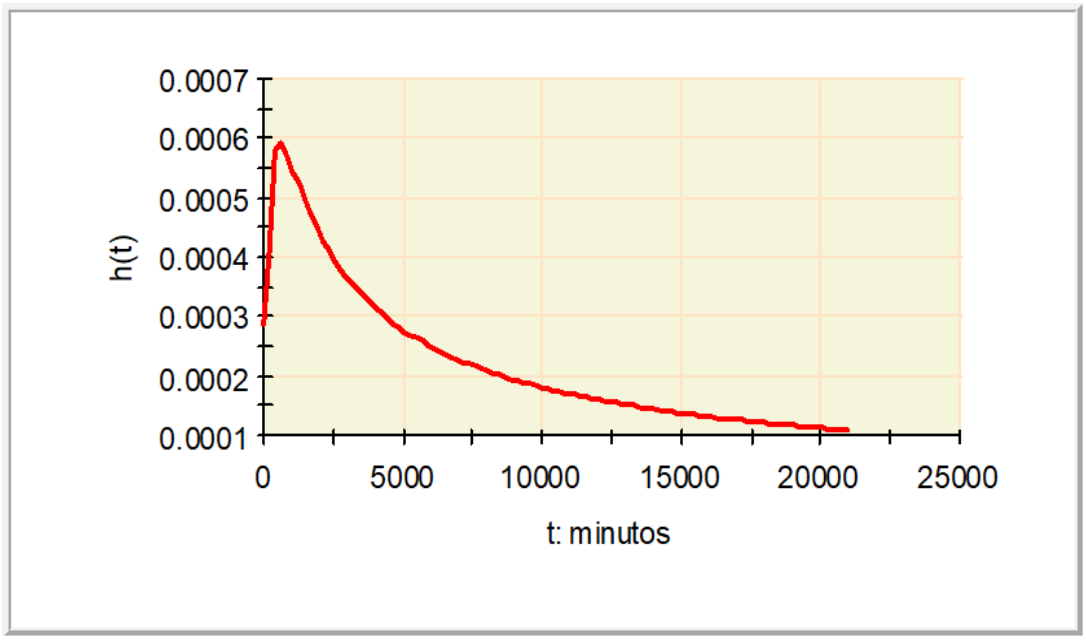
$$R(10080) = 1 - \ 0.9551 = 4.49\%$$

Os resultados obtidos indicam que a confiabilidade da máquina para um dia, ou seja, a probabilidade de que ela opere por um dia sem necessitar de reparos é de 47.57%. Enquanto que a probabilidade de que ela opere por uma semana sem ter problemas é de 4.49%.

4.4. Análise da taxa de falhas e estratégia de manutenção

A taxa de falhas representa a probabilidade de falha em um dado momento no tempo, indicando o(s) período(s) de tempo nos quais há um maior risco de falha. Estes dados auxiliam no planejamento da estratégia de manutenção da máquina, uma vez que se sabendo os períodos que apresentam o maior risco de falhas pode-se adequar o planejamento de manutenção de modo a minimizar o impacto de possíveis falhas. O gráfico 5 apresenta a taxa de falhas ao longo do tempo para a máquina de trefilar em análise.

Gráfico 5 - Taxa de falhas h(t) - MTBF



Fonte: Elaborado pelos autores

O gráfico 5 ilustra os dados já apresentado de que 50% das falhas ocorrem até a marca de 1335.76 minutos e de que o tempo médio entre falhas (MTBF) é de 2657.92 minutos.

Por último, havendo sido concluídas estas análises, a máquina de trefilar em estudo foi posicionada na curva da banheira, para auxiliar no estudo acerca da estratégia de manutenção mais adequada para o equipamento em análise.

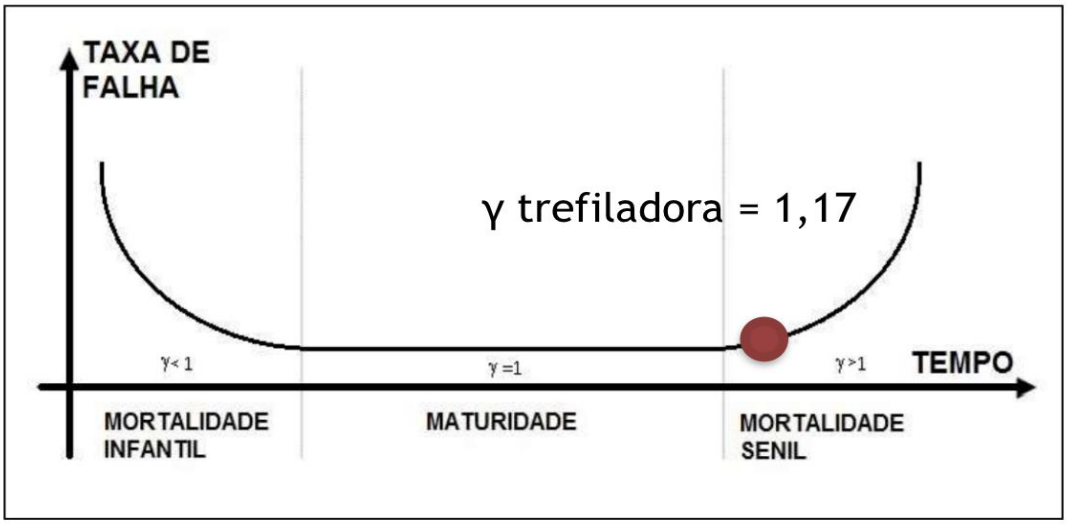
Utilizando as equações já apresentadas, obtêm-se a média estimada:

$$\hat{\mu} = 7.19724$$

E aplicando este valor na equação inicial para o cálculo do parâmetro de forma obtém-se:

$$\gamma = 1.1729$$

Figura 1 - Curva da Banheira



Fonte: Desenvolvida pelos autores

O posicionamento indica que a máquina analisada se encaixa no início da faixa de mortalidade senil, como já era indiciado pelo baixo MTBF encontrado. Para equipamentos que se encontram na fase de mortalidade senil a estratégia de manutenção mais indicada é a manutenção preventiva, uma vez que sabe-se que problemas na

máquina serão frequentes, de modo que manutenções corretivas deixariam a máquina com baixa disponibilidade e análises preditivas de falhas representariam um gasto desnecessário devido a certeza de que as falhas ocorrerão frequentemente.

Manutenção preventiva consiste na definição do tempo esperado de vida de cada componente na máquina para que sua troca seja feita antes do momento em que se estima que o componente venha a falhar, com intuito de manter a máquina com maior disponibilidade.

Para máquinas como a trefiladeira analisada, que não são restrições no sistema produtivo, a estratégia adotada pela empresa é a da manutenção corretiva, ou seja, a empresa conserta equipamentos deste perfil apenas após a ocorrência de falhas, sem fazer esforços para mitigar a ocorrência das falhas.

5. Análise e considerações finais

Apesar da baixa confiabilidade encontrada, representada pelo baixo tempo médio entre falhas, como o tempo médio até o reparo também é curto, a máquina continua a apresentar uma disponibilidade satisfatória de 97.06%.

Embora a estratégia de manutenção atual difira daquela indicada na literatura, que defende a manutenção preventiva como a melhor maneira de lidar com máquinas no estágio de mortalidade senil, a capacidade da empresa de consertar rapidamente somada ao fato de que a máquina em questão não é uma restrição no sistema, de modo que paradas inesperadas nesta máquina não irão necessariamente impactar a produtividade da empresa, resulta em uma estratégia de manutenção satisfatória, ainda que não seja ótima do ponto de vista da disponibilidade, que tenderia a ser mais alta com a manutenção preventiva.

A comparação entre teoria e a realidade encontrada apresenta um dilema para a MCC, pois apesar de não ser a estratégia de manutenção mais indicada pela teoria, a estratégia utilizada pela empresa continua a apresentar bons resultados de disponibilidade. Normalmente não é aconselhada a gestão de um equipamento na fase senil por meio de manutenções corretivas pois espera-se que tal abordagem vá resultar em uma baixa disponibilidade, o que claramente não é o caso com a máquina estudada. Por outro lado, manutenção corretiva é frequentemente associada a uma redução de gastos desnecessário com trocas de peças.

Logo, uma análise crítica através das lentes da manutenção produtiva total (TPM), indica que a estratégia de manutenção aplicada pela empresa seja sim a melhor estratégia para este caso em específico, uma vez que a manutenção corretiva se demonstra capaz de atender os requisitos de disponibilidade e ao mesmo tempo minimizar os gastos totais com manutenção do equipamento.

Deste modo, a identificação da melhor estratégia de manutenção para uma máquina de trefilar, por meio da manutenção centrada em confiabilidade, pode ser desenvolvida. Está analise, dá suporte para a melhor tomada de decisão, no que tange a gestão da manutenção assim como dos ativos da empresa.

REFERÊNCIAS

AHMAD, R.; KAMARUDDIN, S. An overview of time-based and condition based maintenance in industrial application. **Computers & Industrial Engineering**, v.63, n.1, p.135-149, 2012. https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.02.002

ALMEIDA, R.; CARVALHO, A. Análise sistêmica de confiabilidade, mantenabilidade e disponibilidade em uma frota de tratores de esteira: projeto piloto aplicado a mineração. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 26, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 5462: Confiabilidade e mantenabilidade. Rio de Janeiro, 1994.

BRAND, G. **Método de apoio à formulação de estratégia de manutenção em ambiente industrial:** um estudo de caso. Dissertação de Mestrado, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Engenharia de Produção e Sistemas, São Leopoldo: 2002.

CERVEIRA, D.; e SELLITO, M. Manutenção centrada em confiabilidade (mcc): análise quantitativa de um forno elétrico a indução. **Produção Online**, v.15, n.2, p.405-432, 2015. http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v15i2.1615

DEHGHANIAN, P.; FOTUHI-FIRUZABAD, M.; AMINIFAR, F.; BILLINTON, R. A comprehensive scheme for reliability centered maintenance in power distribution systems – part i: methodology. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.28, n.2, pp.761-770, 2013. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2227832

DEHGHANIAN, P.; FOTUHI-FIRUZABAD, M.; AMINIFAR, F.; BILLINTON, R. A comprehensive scheme for reliability centered maintenance in power distribution systems – part ii: numerical analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.28, n.2, pp.771-778, 2013. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2227833

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

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

MARTINS, R. Abordagens quantitativa e qualitativa. In: MIGUEL, P. (org.), **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Campus, 2010.

MENGUE, D.; SELLITTO, M. Estratégia de manutenção baseada em funções de confiabilidade para uma bomba centrífuga petrolífera. **Produção Online**, v.13, n.2, p.759-783, 2013. http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v13i2.1341

MIGUEL, P. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. Produção, v.17, n.1, p.216-229, 2007. http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132007000100015

NAKANO, D. Métodos de pesquisa adotados na Engenharia de Produção e Gestão de Operações. In: MIGUEL, P. (org.), **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Campus, 2010.

National Institute of Standards and Technology (NIST); SEMATECH. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. **National Institute of Standards and Technology**, 2012. Disponível em: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/toolaids/pff/E-Handbook.pdf. Acesso em: 24/03/18.

NIKOLOPOULOS, K.; METAXIOTIS, K.; ASSIMAKOPOULOS, V. Integrating industrial maintenance strategy into ERP. **Industrial Management & Data Systems**, v.103, n.3, pp.184-191, 2003. http://dx.doi.org/10.1108/02635570310465661

SELLITTO, M. Análise estratégica da manutenção de uma linha de fabricação metalmecânica 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.044-059, 2005. http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132005000100005

SIMÕES, J.; GOMES, C.; YASIN, M. A literature review of maintenance performance measurement: directions for future research. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v.17, n.2, pp.116-137, 2013. https://doi.org/10.1108/13552511111134565

SWANSON, L. Linking maintenance strategies to performance. **International Journal of Production Economics**, v.70, n.3, pp.237-244, 2001. https://doi.org/10.1016/S0925-5273(00)00067-0

WRIGHT, R. Wire technology: process engineering and metallurgy. **Butterworth-Heinemann**, 2016.

YSSAAD, B.; KHIAT, M.; CHAKER, A. Reliability centered maintenance optimization for power distribution systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v.55, p.108-115, 2014. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.08.025