

USO DA FERRAMENTA ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA TOMADA DECISÃO NA GESTÃO DE MANUTENÇÃO – ESTUDO DE CASO COMPRESSOR DE AR¹

Bruno Martins Filho²
Geraldo Rossoni Sisquini³
João Paulo Barbosa⁴

Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar o uso da distribuição de Weibull baseado nos dados de histórico de falhas do equipamento para tomada de decisão na Manutenção. São apresentados métodos de cálculo dos parâmetros desta distribuição que são úteis na determinação dos indicadores de confiabilidade. Além disso, acrescentados o monitoramento dos parâmetros da distribuição de Weibull e o acompanhamento da curva de taxa de falha seremos capazes de estimar tempos satisfatórios para a Manutenção Preventiva, assim como, o tempo esperado para futuras falhas. Será apresentada uma simulação do uso da distribuição de Weibull tendo como foco a interpretação dos valores obtidos desta simulação para tomada de decisão na manutenção de um compressor de ar.

Palavras chaves: Confiabilidade; Manutenção; Distribuição de Weibull; Taxa de falha.

USE OF THE TOOL ANALYSIS ESTATÍSTICA FOR TAKING DECISION IN THE MAINTENANCE MANAGEMENT - STUDY OF COMPRESSING AIR CASE

Abstract

This work has as objective to present the use of the distribution of Weibull based on the data of description of imperfections of the equipment for taking of decision in the Maintenance. Methods of calculation of the parameters of this distribution are presented that are useful in the determination of the reliability pointers. Moreover, will be observed of the parameters of the distribution of Weibull and the accompaniment of the curve of failure rate we will be capable esteem satisfactory times for the Preventive maintenance, as well as, the time waited for future imperfections. The interpretation of the gotten values of this simulation for taking of decision in the maintenance of a air compressor will be presented a simulation of the use of the distribution of Weibull having as focus.

Key words: Reliability; Maintenance; Distribution of Weibull; Failure rate.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Professor do Curso Superior de Tecnologia Mecânica (CSTM) – UFES. Engenheiro de Manutenção da CST. Mestrando no curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) - UFES*

³ *D.Sc., Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) - UFES*

⁴ *Mestrando de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) - UFES.*

1 INTRODUÇÃO

Os estudos relativos à confiabilidade vêm recebendo, nos últimos anos, a atenção de especialistas em diversos ramos de empresas, particularmente ligados à área da manutenção. Muitos são os trabalhos desenvolvidos e em desenvolvimento, visando a aplicação da chamada manutenção previsiva, ou controle preditivo de manutenção, que tem por objetivo executar a manutenção preventiva no ponto exato em que eles interferem na confiabilidade do sistema.

Entendemos por controle preditivo de manutenção a determinação do ponto ótimo para execução da manutenção preventiva num equipamento, ou seja, o ponto a partir do qual a probabilidade do equipamento falhar assume valores indesejáveis.

A determinação desse ponto traz como resultado índices ideais de prevenção de falhas, tanto sob o aspecto técnico quanto econômico, uma vez que a intervenção no equipamento não é feita durante o período em que ainda está em condições de prestar serviço, nem o período em que suas características operativas estão comprometidas.

Quando falamos de confiabilidade de equipamentos na forma quantitativa, podemos dizer do equipamento novo com as documentações técnicas fornecidas pelo fabricante, baseado nos indicadores de taxas de falhas, e na observação operacional ao longo do tempo, com todo o histórico das falhas e suas manutenções corretivas. Tanto as simulações feitas em laboratório utilizando métodos de ensaios de vida úteis aceleradas ou dos registros de campo das manutenções realizadas, buscam estabelecer quando e até como poderão ocorrer às falhas dos equipamentos. Neste trabalho buscaremos ao longo dos conceitos teóricos e práticos, estabelecerem os passos a passos de cálculo estatístico dos indicadores de manutenção dos equipamentos, estabelecendo dentro de um conceito mundial os indicadores de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade.

2 INDICADORES DE MANUTENÇÃO

Dentro da estrutura de "Planejamento, Programação e Controle de Manutenção", que deve haver em toda empresa organizada, a função Controle de Manutenção é prioritária sobre as demais. É uma função tipicamente gerencial, mas que deve ser exercida por todos, a começar pelos próprios executantes, que devem realizar o "autocontrole" das suas atividades e continuarem-nos vários níveis de gerência. No caso do controle gerencial, a ferramenta padrão são os Indicadores de Desempenho, também chamados na terminologia da Gestão de Qualidade de "Itens de Controle".

É através deles que se pode realizar o diagnóstico rápido e contínuo da situação e a partir do diagnóstico, tomar as medidas para a correção ou melhorias necessárias para atender aos objetivos da Manutenção.

A utilização de Indicadores de Desempenho, parte do pressuposto da existência de um esquema eficaz e correto de coleta de dados, o que nem sempre acontece. Sem que haja esta condição os indicadores tomam-se números poucos confiáveis, perde-se um bom tempo na sua análise e as ações gerenciais passam a depender da sorte, experiência e sensibilidade dos gerentes. É uma situação desgastante para a gerência que despense um grande esforço para ter domínio da situação, com resultados nem sempre satisfatórios, o que poderia se evitado com a utilização dos indicadores necessários e corretos, na ocasião devida.

Taxa de Falha

É o indicador de Confiabilidade mais simples de se medir e o mais universal. Este é o indicador usado nas famosas "Curvas de Falhas". *É a quantidade de Falhas de um ou mais Itens, em um período de tempo, geralmente semana, mês ou ano.*

$$\text{TAXA DE FALHA} = \frac{\text{QUANTIDADE DE FALHAS DOS ITENS}}{\text{N}^\circ \text{ ITENS} \times \text{TEMPO TOTAL DE OBSERVAÇÃO}}$$

Tempo Médio Entre Falhas (Mean Time Between Failure - MTBF)

É o Indicador de Manutenção mais famoso da literatura técnica e bem antigo. Foi concebido para controle da confiabilidade de componentes simples, do qual existam uma grande quantidade operando em condições iguais, em uma época em que não havia manutenção organizada, nas condições atuais e portanto com um nível de falhas muito altas. Com o tempo foi sendo estendido para o controle de conjuntos e pequenos equipamentos (caso de Bombas e Compressores).

Atualmente é utilizado tipicamente em Indústria de Processo para controle dos equipamentos rotativos que são bastante padronizados e repetitivos nas mesmas.

Assim, temos:

$$\text{MTBF} = \frac{\text{N}^\circ \text{ ITENS} \times \text{TEMPO TOTAL DE OPERAÇÃO DOS ITENS}}{\text{NUMERO TOTAL DE FALHAS DOS ITENS}}$$

No caso de se ter apenas um Item:

$$\text{MTBF} = \frac{\text{TEMPO TOTAL DE OPERAÇÃO DO ITEM}}{\text{NUMERO TOTAL DE FALHAS}}$$

Para Itens de operação contínua e sem paralisações para manutenção, com Taxa de Falha constante (período de estabilidade operacional), *o Tempo Médio Para Falha é o inverso da Taxa de Falha.*

Indicadores de Manutenabilidade

Sendo a Manutenabilidade, em termos práticos, o "grau de facilidade de se dar manutenção em um Item", a maneira prática de medi-la é controlando o tempo de execução de Manutenção Corretiva e Preventiva, dos mesmos Itens, pelos mesmos executantes. Para tal, utilizam-se os seguintes Indicadores:

Tempo Médio Para Reparo (Mean Time To Repair- MTTR)

Para o controle da **MANUTENABILIDADE** o indicador mais utilizado é o "**Tempo Médio para Reparos**" que é "a média de todos os tempos de Paradas por Falha do equipamento ou instalação controlada" Na prática, a evolução do Tempo Médio de Reparo é utilizada para verificar a evolução da produtividade das equipes de manutenção, na manutenção corretiva.

$$\text{MTTR} = \frac{\text{SOMA DOS TEMPOS DE REPARO DO PERÍODO}}{\text{QUANTIDADE DE FALHAS DO PERÍODO}}$$

3 ANÁLISE ESTÁTISTICA

Distribuição Normal: é aplicada quando a característica da falha segue uma tendência normalmente distribuída com variações simetricamente dispostas em torno da média.

Distribuição LogNormal: é aplicada para a determinação de ciclos para a falha devido à fadiga em metais quando submetidos a tensões alternadas, e em estudos de manutenibilidade.

Distribuição de Weibull: sua aplicação permite determinar a fase de falhas prematuras (mortalidade infantil taxa de falhas decrescente), fase de falhas casuais ou aleatórias (taxa de falhas constante) e a taxa de falhas por desgaste (taxa de falhas crescente).

Distribuição de Weibull

Por englobar as três distribuições anteriores, a análise quantitativa será focada na distribuição permite diagnosticar evolução de uma falha em função dos valores de seus parâmetros β , η , t_0 . Esta expressão semi-empírica desenvolvida por Ernest Hjalmar Wallodi Weibull, físico sueco, que em 1939 apresentou o modelo de planejamento estatístico sobre fadiga de materiais.

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right] \rightarrow \text{Função Confiabilidade}$$

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right] \rightarrow \text{Função Probabilidade de Falhas}$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1}\right] \rightarrow \text{Função Taxa de Falhas}$$

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1}\right] \bullet \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right] \rightarrow \text{Função Densidade de Probabilidade de Falhas}$$

$$t = t_0 + \eta \left[\ln \frac{1}{R(t)}\right]^\beta \rightarrow \text{Função Período de Vida associado a uma Confiabilidade}$$

Parâmetros de Weibull

β → parâmetros de forma;

η → parâmetros de escala;

γ → parâmetros de posição.

$0 < \beta < 1$: Componentes ou sistemas com taxa de falha decrescendo uniformemente – falhas prematuras;

$\beta = 1$: Componentes ou sistemas com taxa de falhas constantes – falha aleatórias;

$\beta > 1$: Componentes ou sistemas com taxa de falha crescendo uniformemente – as falhas ocorrem devido ao desgaste, envelhecimento.

$\beta > 2$: Componentes ou sistemas com taxa de falha crescendo linearmente – falhas devido ao desgaste.

η : Característica de vida nominal de componentes ou sistemas,

$R(t = \eta) = 36,79\%$ se $\gamma > 0$ ou $\gamma = 0$;

$R(t = \eta) < 36,79\%$ se $\gamma < 0$

t_0 : Vida mínima ou Confiabilidade intrínseca, indica o tempo de operação no qual o equipamento começa a apresentar falha.

4 ESTUDO DE CASO – COMPRESSOR DE AR

Esse estudo tem como objetivo analisar os problemas de falhas ocorridos no compressor de ar de processo CP 102 na Planta de Fracionamento de Ar da Companhia Siderúrgica de Tubarão bem como determinar os seus indicadores de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade.

Dados técnicos:

- Quantidade: 01 conjunto;
- Estágio: 01;
- Tipo: compressor centrífugo;
- Fluido: Ar (atmosfera);
- Pressão de sucção: - 5.6 Kg/cm²;
- Temperatura de sucção: 37°C;
- Pressão de descarga: 11 Kg/cm²;
- Temperatura de descarga: 37 °C;
- Fabricante: GHH;
- Umidade relativa: 80 % (média).

Tabela 1 - Histórico de Falhas e resumo dos dados:

| Ocorrências | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Data | 10/01/98 | 22/07/98 | 18/06/99 | 20/01/00 | 17/01/01 | 14/01/03 | 25/05/04 | 03/08/04 | 02/01/05 | 17/10/05 |
| Dias entre Ocorrências | - | 193 | 391 | 216 | 362 | 727 | 496 | 81 | 141 | 282 |
| Horas | - | 4.632 | 9.384 | 5.184 | 8.688 | 17.448 | 11.904 | 1.944 | 3.384 | 6.768 |
| Horas para reparo | 250 | 40 | 240 | 44 | 200 | 220 | 48 | 259 | 7,5 | 29 |

4.1 Análise dos Dados

A tabela acima mostra os tempos de funcionamento entre Falhas bem como os tempos de reparo de um determinado equipamento durante um período de campanha.

4.2 Determinação dos Indicadores de Manutenção

A partir de agora iremos trabalhar na Tabela 2 com os dados de falha do compressor e determinar através do uso da distribuição de Weibull os parâmetros de forma, escala e de posição.

Tabela 2 – Análise dos dados

| Ordem | Tempo (t) | Tempo (t) acumulado | F(t) |
|-------|-----------|---------------------|--------|
| 1 | 4.633 | 4633 | 0,0740 |
| 2 | 9.384 | 14017 | 0,2240 |
| 3 | 5.184 | 19201 | 0,3069 |
| 4 | 8.688 | 27889 | 0,4457 |
| 5 | 17.448 | 45337 | 0,7246 |
| 6 | 11.904 | 57241 | 0,9148 |
| 7 | 1.680 | 58921 | 0,9417 |
| 8 | 264 | 59185 | 0,9459 |
| 9 | 3.384 | 62569 | 1,0000 |

4.3 Para determinação do parâmetro de posição “t₀”, há três métodos:

- Por tentativa
- Gráfico
- Programa de computador

Por tentativa → escolhe-se valores arbitrários para “t₀”. O valor que fornece o melhor coeficiente de correlação, será o mais adequado.

Por gráfico → através de utilização de papéis gráficos (team chartwell, por exemplo), e utilização da fórmula abaixo:

$$T_0 = t_2 - \frac{(t_3 - t_2) \cdot (t_2 - t_1)}{(t_3 - t_2) - (t_2 - t_1)}$$

Por programas computacionais →: Cálculo feito por tentativas, onde diversos valores para “t₀” são testados, sendo escolhido aquele que apresenta o melhor coeficiente de correlação. No caso deste problema como o equipamento já no início de sua operação ocorreu a falha, vamos considerar o valor de t₀ = 0 horas.

Para determinação dos parâmetros de Weibull, sabemos que a frequência acumulada de falhas para a distribuição é :

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right], \text{ na forma linear, temos:}$$

$$\ln \{ - \ln [1 - F(t)] \} = \beta \cdot \ln (t - t_0) - \beta \cdot \ln \eta$$

$$Y = a \cdot X + b$$

Portanto, podemos construir a seguinte tabela:

Tabela 3 – Cálculos dos parâmetros

Parâmetros

t_0 = Confiabilidade Intrínseca

β = Fator de Forma

η = Vida Característica

| Ord. | T | F(t) | Y | Valores de "X" | | | | | Valores de t_0 |
|------|-------|--------|---------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------|
| | | | | Ln (t-t01) | Ln(t-t02) | Ln(t-t03) | Ln(t-t04) | Ln(t-t05) | |
| 1 | 4633 | 0,074 | -2,5655 | 8,4410 | 8,1978 | 7,8759 | 7,3982 | 6,4505 | 0 1000 2000 3000 4000 |
| 2 | 14017 | 0,224 | -1,3720 | 9,5480 | 9,4740 | 9,3941 | 9,3072 | 9,2120 | |
| 3 | 19201 | 0,3069 | -1,0035 | 9,8627 | 9,8092 | 9,7527 | 9,6928 | 9,6291 | |
| 4 | 27889 | 0,4457 | -0,5275 | 10,2360 | 10,1995 | 10,1616 | 10,1222 | 10,0812 | |
| 5 | 45337 | 0,7246 | 0,2543 | 10,7219 | 10,6996 | 10,6768 | 10,6534 | 10,6295 | |
| 6 | 57241 | 0,9148 | 0,9013 | 10,9550 | 10,9374 | 10,9195 | 10,9012 | 10,8826 | |
| 7 | 58921 | 0,9417 | 1,0446 | 10,9840 | 10,9668 | 10,9494 | 10,9317 | 10,9137 | |
| 8 | 59185 | 0,9459 | 1,0705 | 10,9884 | 10,9714 | 10,9540 | 10,9364 | 10,9184 | |

Aplicando a regressão linear, para a determinação de β e η temos:

4.4 Determinação do coeficiente angular (β)

$$a = \beta = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \cdot \sum_{i=1}^n Y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2}$$

4.5 Determinação do coeficiente linear ($-\beta \cdot Ln \cdot \eta$)

$$b = -\beta \cdot Ln \cdot \eta = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} - a \cdot \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

4.6 Para determinação do coeficiente de correlação (r)temos:

$$r = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \cdot \sum_{i=1}^n Y_i}{\left[\sqrt{n \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2} \right] \cdot \left[\sqrt{n \cdot \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2} \right]}$$

Obs1: Caso o par de pontos, para um valor qualquer de "t" e "F(t) igual a 1". Não entre com este par de pontos, pois na forma linear "Ln { - Ln [1 - F(t)]}", carretará numa impossibilidade de cálculo.

Obs2: Os 5 valores de t_0 irão auxiliar na obtenção do melhor "coeficiente de correlação". O maior coeficiente de correlação (visualizado na pasta Solução), será aquele que irá fornecer os parâmetros "b" e "h" da Distribuição de Weibull. O cálculo é feito por tentativa. Para cada valor de " t_0 " será determinado um par de parâmetros da Distribuição de Weibull. Os parâmetros, a serem escolhidos, serão aqueles que apresentarem o "maior" coeficiente de correlação.

Importante:

O maior valor de " t_0 " deve ser menor que o menor "Tempo Para Falhar". Se observarmos a fórmula da Distribuição de Weibull, na forma linear, se " t_0 " for maior ou igual a "t" teremos uma impossibilidade de cálculo para "Ln (t - t_0)".

Tabela 4 – Resultados dos parâmetros

| n (número de pares de pontos) = | | 8 | | | | | | |
|--|----------|---|---------|---------|---------|------|----------|----------------|
| t ₀ | Soma X | Soma Y | Soma Y2 | Soma X2 | Soma XY | Beta | Eta | Coef. Cor. (r) |
| 0 | 81,74 | -2,20 | 12,86 | 840,83 | -14,22 | 1,44 | 33107,45 | 0,9849 |
| 1000 | 81,26 | -2,20 | 12,86 | 831,96 | -13,48 | 1,33 | 31679,87 | 0,9800 |
| 2000 | 80,68 | -2,20 | 12,86 | 821,76 | -12,52 | 1,20 | 30152,26 | 0,9726 |
| 3000 | 79,94 | -2,20 | 12,86 | 809,20 | -11,16 | 1,04 | 28446,96 | 0,9598 |
| 4000 | 78,72 | -2,20 | 12,86 | 790,56 | -8,57 | 0,82 | 26279,16 | 0,9319 |
| Combinções dos Parâmetros da Distribuição de Weibull | | | | | | | | |
| t ₀ | Beta (β) | Considerações | | | | | | |
| = "Zero" | < 1 | Falhas de ruptura devido a altos esforços. | | | | | | |
| | = 1 | Falhas randômicas ou aleatórias | | | | | | |
| | > 1 | Falhas por desgaste. | | | | | | |
| > "Zero" | < 1 | Falhas por fadiga | | | | | | |
| | > 1 | Falhas por erosão | | | | | | |
| < "Zero" | < 1 | Falhas prematuras (baixa margem de segurança) | | | | | | |
| | > 1 | Vida útil vencida. | | | | | | |

Com os dados dos parâmetros acima, podemos determinar a probabilidade de o compressor falhar num dado período de tempo “t” de operação. Vamos como, por exemplo, determinar a probabilidade de falha do equipamento no tempo 30.000 horas, e a Confiabilidade do equipamento não falhar no tempo de 50.000 horas.

4.7 Probabilidade de falha do equipamento em t = 30.000 horas:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t - t_0}{\eta}\right)^\beta\right] = F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{30.000 - 0}{33107,45}\right)^{1,44}\right]$$

$F(t) = 1 - 0,4199 = 0,5800$ (portanto a probabilidade de falha neste tempo será de aproximadamente 58 %)

4.8 Probabilidade do equipamento não falhar no tempo de 50.000 horas:

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left[-\left(\frac{t - t_0}{\eta}\right)^\beta\right] = \exp\left[-\left(\frac{50.000 - 0}{33107,45}\right)^{1,44}\right]$$

$R(t) = 0,1635$ (portanto a Confiabilidade do equipamento neste tempo será de 16,35 %)

4.9 Determinação do Tempo Médio para Falhar (MTTF):

$$MTTF = t_0 + \eta \cdot \Gamma(1 + \beta^{-1})$$

Considerando o $t_0 = 0$, temos:

$$MTTF = 0 + 33.107,45 \cdot \Gamma(1 + 1,44^{-1})$$
 - Utilizando a tabela da função Gama, temos:

$$MTTF = 30.037,87$$
 (para o $t_0 = 0$)

4.10 Determinação do desvio padrão (DP):

$$\sigma = \eta \cdot \left[\Gamma(1 + \beta^{-1}) - \Gamma^2(1 + \beta^{-1}) \right]^{1/2}$$

$$\sigma = 33.107,87 \cdot \left[\Gamma(1 + 1,44^{-1}) - \Gamma^2(1 + 1,44^{-1}) \right]^{1/2}$$

$$\sigma = 20.774,99$$

4.11 Determinação do coeficiente de variação (CV):

$$CV = \frac{\sigma}{MTTF - t_0} = \frac{20.774,99}{30.037,87 - 0} = 0,6916$$

Tabela 5 – Resultado do MTBF

| MTBF ou TMPF, Desvio Padrão (DP) e Coef. Variação (CV) | | | | |
|--|--------|-----------|----------|--------|
| t0 | r | MTBF - t0 | DP | CV |
| 0 | 0,9849 | 30037,87 | 20774,99 | 0,6916 |
| 1000 | 0,9800 | 29125,06 | 21363,39 | 0,7335 |
| 2000 | 0,9726 | 28348,57 | 22034,63 | 0,7773 |
| 3000 | 0,9598 | 27951,60 | 22277,42 | 0,7970 |
| 4000 | 0,9319 | 29293,17 | 9732,55 | 0,3322 |

4.12 Determinação de tempo para intervenção preventiva:

Baseado nos parâmetros da distribuição de Weibull, podemos determinar o tempo ótimo para uma tal confiabilidade para intervenção preventiva. Com isso podemos estabelecer baseado na função de confiabilidade a expressão:

$$t = t_0 + \eta \cdot \left(\ln \frac{1}{R(t)} \right)^{1/\beta}$$

Considerando uma confiabilidade de 90 % podemos a partir de então determinar o ciclo estimado de uma manutenção preventiva no compressor.

$$t = 0 + 33.107,87 \cdot \left(\ln \frac{1}{0,9} \right)^{1/1,44}$$

$$t = 0 + 33.107,87 \cdot (0,2095) = \mathbf{6.938 \text{ horas ou aproximadamente 10 meses.}}$$

4.13 Gráfico de Confiabilidade:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{33.107,87} \right)^{1,44} \right]$$

Tabela 6 – Dados

| t | R(t) | F(t) |
|--------|--------|--------|
| 000 | 0,9690 | 0,0310 |
| 8000 | 0,8787 | 0,1213 |
| 13000 | 0,7709 | 0,2291 |
| 18000 | 0,6598 | 0,3402 |
| 23000 | 0,5533 | 0,4467 |
| 28000 | 0,4558 | 0,5442 |
| 33000 | 0,3696 | 0,6304 |
| 38000 | 0,2954 | 0,7046 |
| 43000 | 0,2329 | 0,7671 |
| 48000 | 0,1814 | 0,8186 |
| 53000 | 0,1396 | 0,8604 |
| 58000 | 0,1062 | 0,8938 |
| 63000 | 0,0800 | 0,9200 |
| 68000 | 0,0597 | 0,9403 |
| 73000 | 0,0441 | 0,9559 |
| 78000 | 0,0322 | 0,9678 |
| 83000 | 0,0234 | 0,9766 |
| 88000 | 0,0168 | 0,9832 |
| 93000 | 0,0120 | 0,9880 |
| 98000 | 0,0085 | 0,9915 |
| 103000 | 0,0059 | 0,9941 |
| 108000 | 0,0041 | 0,9959 |

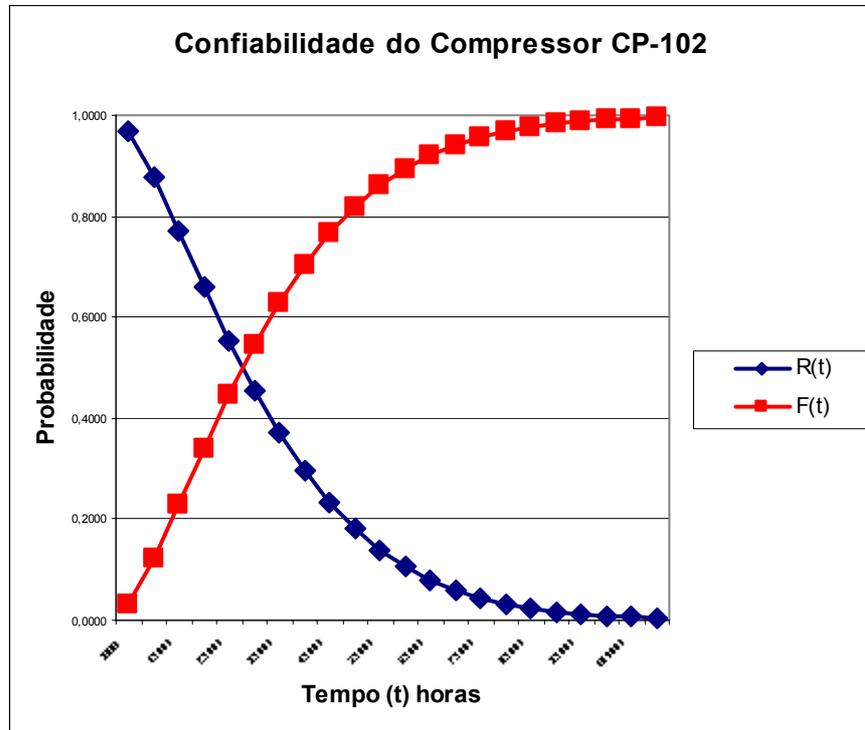


Figura 1 - Confiabilidade do Compressor

4.14 A Função Manutenibilidade

Manutenibilidade é um índice associado a um equipamento sob reparo. É a probabilidade que um equipamento em falha será reparado dentro de um tempo "t". Se "T" é uma variável randômica representando o tempo de reparo, então a Manutenibilidade é definida como:

$$M(t) = \Pr(T \leq t)$$

Para o caso em que o tempo de reparo é exponencialmente distribuído, com uma taxa de reparo (μ), então a função densidade probabilidade é dada por:

$$m(t) = \mu \cdot \exp(-\mu \cdot t)$$

$$M(t) = \int_0^t \mu \cdot \exp(-\mu \cdot t) \cdot dt = 1 - \exp(-\mu \cdot t)$$

O valor esperado do tempo de reparo é chamado de MTTR (Tempo Médio Para Reparo) e, é dado por:

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] \cdot dt = \frac{1}{\mu}$$

As fórmulas abaixo, representam a Manutenibilidade [M(t)] e o Tempo Médio Para Reparo (MTTR).

$$M(t) = \phi \cdot \left(\frac{\text{Log}t_e - \text{Log}\beta_e}{\alpha} \right)$$

$$MTTR = \beta \cdot \exp\left(\frac{\alpha^2}{2}\right)$$

Considerando os dados do caso em estudo, temos:

Tabela 7 – Histórico de tempos de reparos

| Ordem | Tempo (t) | Tempo (t) acumulado | M(t) |
|-------|-----------|---------------------|--------|
| 2 | 40 | 40 | 0,0377 |
| 3 | 240 | 280 | 0,2644 |
| 4 | 44 | 324 | 0,3059 |
| 5 | 200 | 524 | 0,4948 |
| 6 | 220 | 744 | 0,7025 |
| 7 | 48 | 792 | 0,7478 |
| 8 | 259 | 1051 | 0,9924 |
| 9 | 8 | 1059 | 1 |

Tabela 8 – Cálculos dos parâmetros para MTTR

| Cálculo dos Parâmetros da Distribuição Lognormal | | | | | | | | |
|--|------|--------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Parâmetros | | | Forma Linear | | | | | |
| t ₀ = tempo mínimo para reparo | | | $\phi^{-1}[M(t)] = \frac{\text{Ln}(t - t_0)}{\alpha} - \frac{\text{Ln}\beta}{\alpha}$ | | | | | |
| α = Fator de Forma | | | | | | | | |
| β = Fator de Escala | | | | | | | | |
| Valores de "X" | | | | | | | | |
| Ord. | t | M(t) | Y | Ln(t-t01) | Ln(t-t02) | Ln(t-t03) | Ln(t-t04) | Ln(t-t05) |
| 1 | 40 | 0,0377 | -1,7784 | 3,6889 | 3,4012 | 2,9957 | 2,3026 | 0,0000 |
| 2 | 280 | 0,2644 | -0,6295 | 5,6348 | 5,5984 | 5,5607 | 5,5215 | 5,4848 |
| 3 | 324 | 0,3059 | -0,5071 | 5,7807 | 5,7494 | 5,7170 | 5,6836 | 5,6525 |
| 4 | 524 | 0,4948 | -0,0130 | 6,2615 | 6,2422 | 6,2226 | 6,2025 | 6,1841 |
| 5 | 744 | 0,7025 | 0,5312 | 6,6120 | 6,5985 | 6,5848 | 6,5709 | 6,5582 |
| 6 | 792 | 0,7478 | 0,6673 | 6,6746 | 6,6619 | 6,6490 | 6,6359 | 6,6241 |
| 7 | 1051 | 0,9924 | 2,4280 | 6,9575 | 6,9479 | 6,9383 | 6,9285 | 6,9197 |

Tabela 9 – Resultados dos parâmetros

| n (número de pares de pontos) = 7 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|----------|----------------|
| t ₀ | Soma X | Soma Y | Soma Y2 | Soma X2 | Soma XY | Alfa | Beta | Coef. Cor. (r) |
| 0 | 41,61 | 0,70 | 10,44 | 254,66 | 11,74 | 0,9643 | 346,5645 | 0,8711 |
| 10 | 41,20 | 0,70 | 10,44 | 251,13 | 12,25 | 1,0615 | 323,6729 | 0,8599 |
| 20 | 40,67 | 0,70 | 10,44 | 247,01 | 12,97 | 1,2046 | 295,7555 | 0,8448 |
| 30 | 39,85 | 0,70 | 10,44 | 241,78 | 14,21 | 1,4631 | 256,2681 | 0,8212 |
| 39 | 37,42 | 0,70 | 10,44 | 235,05 | 18,31 | 2,4003 | 165,1240 | 0,7651 |

Considerando os valores de alfa e beta para o tempo de melhor coeficiente de correção temos:

$$MTTR = \beta \cdot \exp\left(\frac{\alpha^2}{2}\right)$$

$$MTTR = 346,5645 \cdot \exp\left(\frac{0,9643^2}{2}\right)$$

O tempo médio para reparo do compressor é de 551,70 horas.

5 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento de um plano de Manutenção através de análises estatísticas, podemos definir as periodicidades de manutenção, bem como acompanhar a evolução das taxas de falhas no tempo. Para maximizar a disponibilidade, podemos reduzir os tempos de reparo através das análises das falhas, eliminando possíveis reincidências e também otimizando os métodos de diagnósticos durante as manutenções corretivas, reduzindo-se os tempos de parada. Desta forma, a vida útil dos equipamentos certamente irá aumentar, mais confiáveis serão, garantindo uma campanha operacional maior, otimizando também os recursos de manutenção, com relação aos sobressalentes.

O estudo de caso mostrou os indicadores do compressor 2400 na fábrica de oxigênio da CST, onde com os valores de obtidos com os intervalos entre as falhas e os seus tempos de reparo, contamos os indicadores de MTBF e MTTR. Para determinar o melhor momento de fazer manutenção baseado em análise estatística para determinação da confiabilidade e a sua disponibilidade operacional no tempo em estudo foram utilizados os cálculos baseado nas formulas de distribuição estatística e ferramentas como método dos mínimos quadrados para facilitar os cálculos.

Este compressor teve seu MTBF baixo em relação à outros equipamentos de mesmo porte na Companhia Siderúrgica de Tubarão - CST. O tempo inicial para manutenção preventiva era a cada 2 anos, pois o mesmo sugerido pelo fabricante e planejado para outros equipamentos. Como verificado o tempo ótimo para preventiva fica abaixo deste, ficando em 10 meses.

Antes deste estudo, foi analisado a como erro de projeto, pois as falhas eram diversas e sistêmicas. Verificado o resultado dos parâmetros de Weibull, podemos contar que o beta ficou próximo da análise de mortalidade infantil.

Com todo o exposto o estudo, assim como o aprendizado de ferramentas de estatística auxiliaram para tomada de decisão na Manutenção de ativos, além de direcionar o quanto é importante ter os dados de histórico para auxílio em melhor gestão nas Manutenções.

Agradecimentos

Ao professor Geraldo Rossoni Sisquini, D.Sc (UFES) pela sua sabedoria e presteza em orientar a realização deste trabalho.

Ao engenheiro e Gerente da Companhia Siderúrgica de Tubarão, Devarsi Zanotelli, por acreditar na ferramenta de gestão de manutenção desenvolvida neste trabalho.

A Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST pelo apoio dado para realização deste trabalho com disponibilidade de dados e tempo aplicados para pesquisas e desenvolvimento deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- 1 TAVARES, L. **Administração Moderna da Manutenção**. Ed. Novo Pólo, 1999.
- 2 GAMA, M. P. **Apostila do curso de Pós Graduação Eng^a de Manutenção - UFES**. Vitória, 2002.
- 3 BRANCO, G. F. , Otimização de Manutenção. **Apostila de Curso de Manutenção na Associação Brasileira de Manutenção – ABRAMAN**. Rio de Janeiro 2001.
- 4 Trabalho apresentado no Mestrado: SISQUINI, G. R. **Confiabilidade**, Vitória: Pós graduação UFES, 2005.
- 5 Trabalho apresentado em evento: ROLIM, R. Como obter indicadores de Confiabilidade. **Tratamento matemático da falha**. Revista n^o 27 p. 18-20 da empresa Engfaz, 2004. www.engfaz.com.br
- 6 SISMANA, Software de Manutenção da CST. **Apostila da Gestão da Manutenção**, Vitória 2006.
- 7 Trabalho apresentado na CST: GOMES, H.C. Relatório de Causalidade do compressor 102. **Compressor CP-102** , Vitória: 2006
- 8 Trabalho apresentado na internet: SEIXAS, E.S. Qualidade e tecnologia de Sistemas. **Weibull – Cálculo Matemático** www.qualitek.com.br. 2006