

## MODELAGEM DOS TEMPOS DE FALHA DE UM TURBOGERADOR

Davydson Gabriel Rocha (UFVJM) E-mail: davydson10@hotmail.com  
Giovane Rocha Martins (UFVJM) E-mail: giovanemartins.moc@outlook.com  
Paulo César de Resende Andrade (UFVJM) E-mail: paulo.andrade@ict.ufvjm.edu.br

**Resumo:** A manutenção era direcionada simplesmente para manter o bom funcionamento de equipamentos ou sistemas e, por esse motivo, era vista como um gerador de custos para as empresas. A necessidade de equipamentos com alta disponibilidade e confiabilidade vem alterando o significado de manutenção. A utilização de técnicas de confiabilidade possibilita descrever o comportamento dos tempos de falhas dos equipamentos e definir o tipo de manutenção adequada, com o intuito de garantir o pleno funcionamento do sistema, evitando o alto custo das manutenções. Este trabalho tem por objetivo modelar os tempos de falhas de um turbogerador por meio da análise de confiabilidade paramétrica. O método de pesquisa utilizado consistiu no estudo de caso. Foram analisados os tempos de falha de um turbogerador operando em regime de 24 horas, por mais de 30.000 horas de funcionamento. Além dos métodos gráficos, foram utilizados os testes de aderência de Qui-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov para verificar qual distribuição melhor se ajusta ao conjunto amostral. A análise foi feita com o *software* ProConf. A estimação dos parâmetros das distribuições foi realizada pelo método da máxima verossimilhança. A distribuição *Weibull* foi que melhor se ajustou ao conjunto de dados. A função de risco teve um comportamento decrescente e o valor do parâmetro de forma gama foi menor que 1, indicando que o equipamento se encontra na fase de mortalidade infantil. A estratégia é adotar a manutenção corretiva.

**Palavras-chave:** Confiabilidade, Fases de Vida, Manutenção, Risco, *Weibull*.

## MODELING THE FAILURE TIMES OF A TURBOGGER

**Abstract:** Maintenance was directed simply to maintain the proper functioning of equipment or systems and, for this reason, it was seen as a cost generator for companies. The need for equipment with high availability and reliability has been changing the meaning of maintenance. The use of reliability techniques makes it possible to describe the behavior of equipment failure times and to define the type of adequate maintenance, in order to guarantee the full operation of the system, avoiding the high cost of maintenance. This work aims to model the failure times of a turbogenerator by means of parametric reliability analysis. The research method used consisted of the case study. The failure times of a turbogenerator operating on a 24-hour regime were analyzed for more than 30,000 operating hours. In addition to the graphical methods, the adhesion tests of Chi-Square and Kolmogorov-Smirnov were used to verify which distribution best fit the sample set. The analysis was done with ProConf software. The estimation of the parameters of the distributions was performed by the maximum likelihood method. The Weibull distribution was the best fit to the data set. The risk function had a decreasing behavior and the gamma parameter value was less than 1, indicating that the equipment is in the infant mortality phase. The strategy is to adopt corrective maintenance.

**Keywords:** Reliability, Life Phases, Maintenance, Risk, Weibull.

### 1. Introdução

O conceito de manutenção vem sendo modificado, se moldando conforme a crescente necessidade que o mercado impõe (MOUBRAY, 1996). As alterações são feitas em função de sistemas de gestão que se tornam ultrapassados de acordo com o crescimento industrial. Segundo Gursky (2002), durante um longo período, a manutenção era direcionada simplesmente para retomar o bom funcionamento de equipamentos ou sistemas e, por esse motivo, era vista como um gerador de custos para as empresas. Dada as modificações em seu conceito, a função atual da manutenção é assegurar que um

processo de produção industrial ocorrerá com confiabilidade, segurança e custos adequados.

Conforme Fogliatto e Ribeiro (2009), a confiabilidade é a probabilidade de que um determinado item exercerá sua função satisfatoriamente, por um período de tempo definido, sob condições de operação determinadas. É possível determinar a confiabilidade para um item através da modelagem dos tempos de falha.

A modelagem dos tempos até a falha é, portanto, central em estudos de confiabilidade (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009). Geralmente é realizada com apoio de um *software* modelador, que indica a distribuição que melhor se ajusta a estes tempos. As distribuições de probabilidade que frequentemente são mais utilizadas para descrever os tempos até a falha de componentes e sistemas são: Exponencial, Gama, Lognormal e *Weibull* (HAVIARAS, 2005). A análise é baseada na distribuição de probabilidade que melhor se ajusta aos dados de tempo de falha do item analisado (WUTKE; SELITTO, 2008). As funções mais utilizadas na análise em um estudo de confiabilidade são: função confiabilidade  $R(t)$ , função densidade de falhas  $f(t)$  e função de risco ou taxa de falha  $h(t)$  (CERVEIRA; SELITTO, 2015). O comportamento de determinado produto com relação à falha é melhor compreendido pelo estudo de tempo desta e exame do comportamento de sua taxa de falha (COLOSSIMO; FREITAS, 1997).

A análise de falhas é fundamental para compreensão do tipo de manutenção mais adequada ao comportamento de desempenho dos equipamentos, evitando a aplicação de atividades desnecessárias ou ineficazes que reduzem a disponibilidade, confiabilidade e geram custos operacionais (MENDES, 2011). Vários estudos foram desenvolvidos com comprovadas adequações a várias situações práticas (BRANDÃO e ANDRADE, 2018; DUEK, 2005; GOMES *et al.*, 2018; LEAL e ANDRADE, 2018; SANTOS *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2017; SILVA e ANDRADE, 2018).

A proposta desse artigo é modelar o tempo de falha, em horas, de um turbogerador com potência nominal de 80MVA, utilizando os conceitos de análise de confiabilidade paramétrica.

## 2. Material e Métodos

O procedimento de pesquisa empregado no presente trabalho foi o estudo de caso de um turbogerador. Um turbogerador é a combinação de uma turbina diretamente conectada a um gerador síncrono para geração de energia (KLEMPNER e KERSZENBAUM, 2004). Trata-se de uma máquina térmica que utiliza a energia do vapor sob forma de energia cinética a fim de movimentar as turbinas, transformando energia térmica em energia mecânica para acionar o gerador. Para alcançar um fluxo de vapor contínuo por meio da turbina, a máxima energia do sistema termodinâmico em forma de calor na entrada e saída de vapor da turbina descreve o trabalho mecânico utilizado para movimentar o gerador (REIN, 2013 apud MORAES, 2015). O projeto de um turbogerador pode ser adaptado para turbinas a vapor ou a gás, para fundações abertas ou fechadas, para geradores terrestres ou adequações em navios, plataformas petrolíferas, entre outros.

Os dados foram extraídos de VIANA *et al.* (2017), sendo o turbogerador submetido a um regime de operação diário de 24 horas e analisado durante um tempo de 30.764,45 horas, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Tempos até a falha, em horas, do turbogerador

Tempos até a falha (horas)							
1,2	165,65	360,37	151,67	49,37	21,68	0,28	249,68
197,05	594,13	83,88	329,93	226,8	324,53	1493,08	24,83
368,18	0,2	149,85	189,28	9,58	985,9	863,35	545,2
9,58	0,58	150,52	493,32	18,32	455,4	0,47	590,2
146,97	1,88	43,58	484,82	208,63	2,07	340,6	358,52
862,02	9,55	214,3	0,05	551,55	1255,13	905,62	656,4
26,67	82,23	57,4	116,75	63,62	140,27	473,2	169,88
506,97	682,5	1,57	43,35	16,65	162,02	47,78	511,4
135,63	146,67	46,52	1429,68	966,27	619,62	0,48	334,73
139,2	1	46,67	0,63	11,53	157,28	76,55	46,87
55,55	204,73	129,1	8,3	884,85	631,15	54,53	18,95
804,5	117,88	108,37	477,78	26,02			

Fonte: VIANA *et al* (2017)

A análise do conjunto de dados utilizados nesta pesquisa foi realizada por meio do software ProConf (FRITSCH e RIBEIRO, 1998). Os histogramas de frequência das falhas e os papéis de probabilidades foram utilizados para comparar as curvas da distribuição e verificar qual modelo apresenta melhor aderência aos dados amostrais.

Os testes utilizados para verificar a aderência destas distribuições candidatas aos dados foram o Qui-Quadrado ( $\chi^2$ ) e o Kolmogorov-Smirnov (K-S). O Qui-Quadrado consiste na soma das diferenças entre a frequência esperada e a frequência observada para cada intervalo de tempo, e no Kolmogorov-Smirnov (K-S) a diferença é calculada pela maior distância entre a frequência teórica do modelo em análise e a frequência acumulada dos tempos de falha. O *software* informa o nível de significância e aponta quais distribuições não podem ser rejeitadas (FRITSCH e RIBEIRO, 1998). A validação é dada se o nível de significância for maior que 5% em ambos os testes de aderência. Quando o mesmo é maior a 5% em ambos os testes, a distribuição não pode ser rejeitada, o que significa que poderá ser utilizada na modelagem.

Após realizar os testes de aderência, seleciona-se então a distribuição que melhor modela o conjunto de dados. Em seguida é feito o ajuste dos parâmetros e fornecidas as estimativas dos parâmetros da distribuição de probabilidade que melhor modela o conjunto de dados em estudo, utilizando o método de máxima verossimilhança. Além disso, são apresentadas as representações das funções de confiabilidade  $R(t)$  e de risco ou taxa de falha  $h(t)$ .

A função de risco  $h(t)$ , ao longo do ciclo de vida de um componente, pode ser representada pela curva da banheira. Através desta curva é possível observar a conduta de um equipamento referente à taxa de falha apresentada no decorrer do tempo. São três os períodos que descrevem a vida de componentes e sistemas: mortalidade infantil, vida útil (fase de maturidade), e envelhecimento (mortalidade senil), conforme Figura 1 (LAFRAIA, 2001; SELITTO, 2005 apud CERVEIRA; SELITTO, 2015).

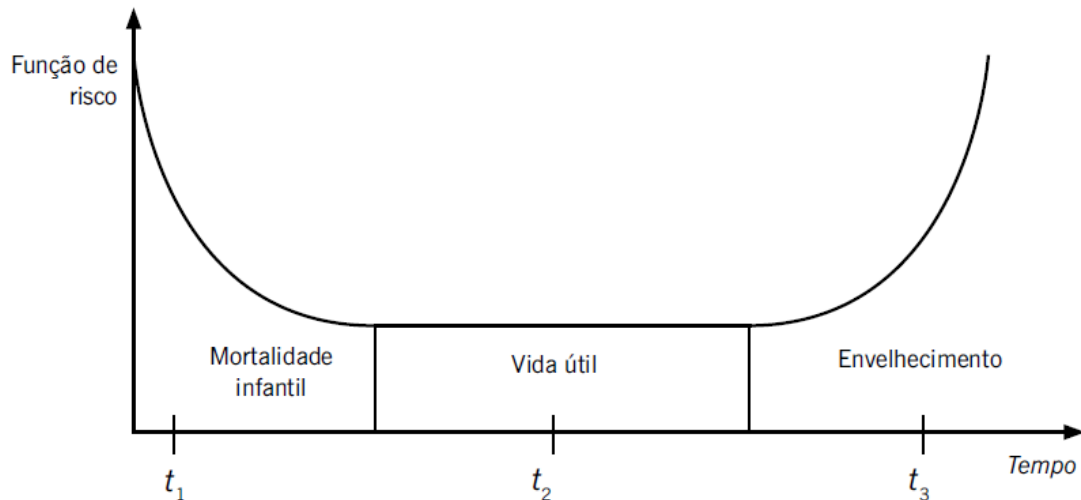


Figura 1 – Período de vida ao longo da curva da banheira

Para unidades que apresentam funções de risco diferentes, uma potencial distribuição modeladora é a *Weibull*. Sellitto (2005) relaciona cada fase da curva a um comportamento da função de risco  $h(t)$  pelo parâmetro de forma  $\gamma$  da distribuição de *Weibull*. Cada fase do ciclo de vida está associada com uma estratégia de manutenção mais adequada. Quando  $\gamma$  for menor do que 1, a função de risco é decrescente e o item se encontra na fase de mortalidade infantil, sendo a estratégia de manutenção corretiva a mais adequada. Quando  $\gamma$  for maior que 1, a função de risco é crescente, logo a fase de vida do item se encontra na mortalidade senil e a estratégia a ser adotada deve ser a preventiva. E quando  $\gamma$  for igual a 1, a função de risco é constante, indicando a fase de vida útil do item, sendo a manutenção preditiva a estratégia mais adequada.

De acordo com Gutiérrez (2005), um equipamento que se encontra na fase da mortalidade infantil apresenta diversas falhas devido à problemas de manufatura, projeto e instalação. As falhas que ocorrem no período da vida útil são ocasionadas por condições inadequadas de manuseio, como também por motivos aleatórios. Já na fase de envelhecimento ocorre um aumento na taxa de falhas que estão relacionadas ao consequente desgaste, deterioração e envelhecimento do equipamento.

### 3. Resultados e Discussão

Com base no conjunto de dados analisado foram obtidos alguns gráficos. Na Figura 2 está representado o histograma da frequência das falhas.

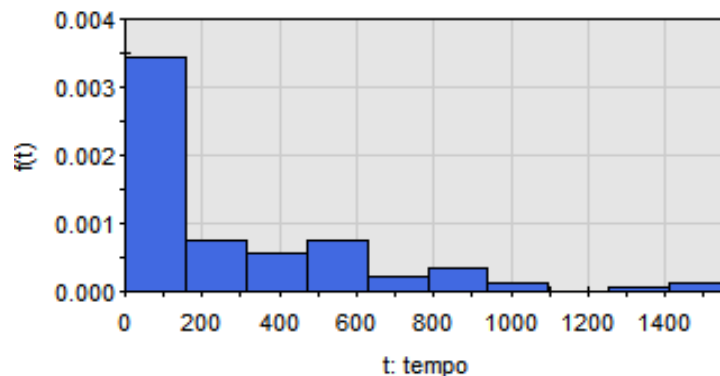


Figura 2 – Histograma de frequência de falhas  
Fonte: ProConf

Observa-se no histograma da Figura 2 que muitas falhas ocorrem no primeiro intervalo, dando indícios de uma possível mortalidade infantil. Na Figura 3 está apresentado o histograma da taxa de falha  $h(t)$ .

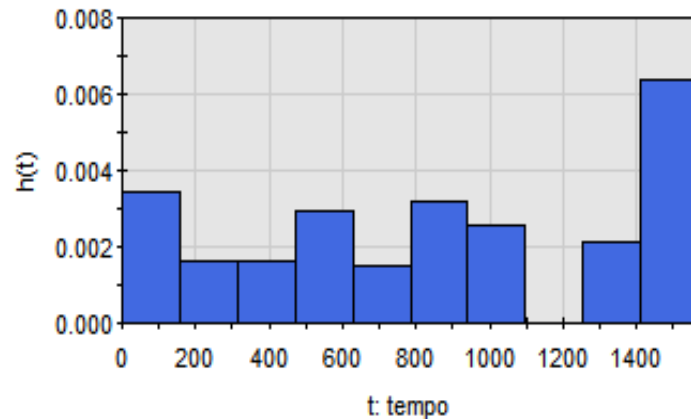


Figura 3- Histograma da taxa de falha  
Fonte: ProConf

O formato do histograma da Figura 3 é também um indicativo da distribuição *Weibull* como mais adequada para modelar o conjunto de dados em análise. Há uma perspectiva de associação com a curva da banheira.

Os gráficos do papel de probabilidade permitem fazer o teste de hipóteses, onde se verifica a adequação dos dados a determinada distribuição. Na Figura 4 está apresentado o gráfico de papel de probabilidade das distribuições Exponencial, *Weibull*, Lognormal e Normal.

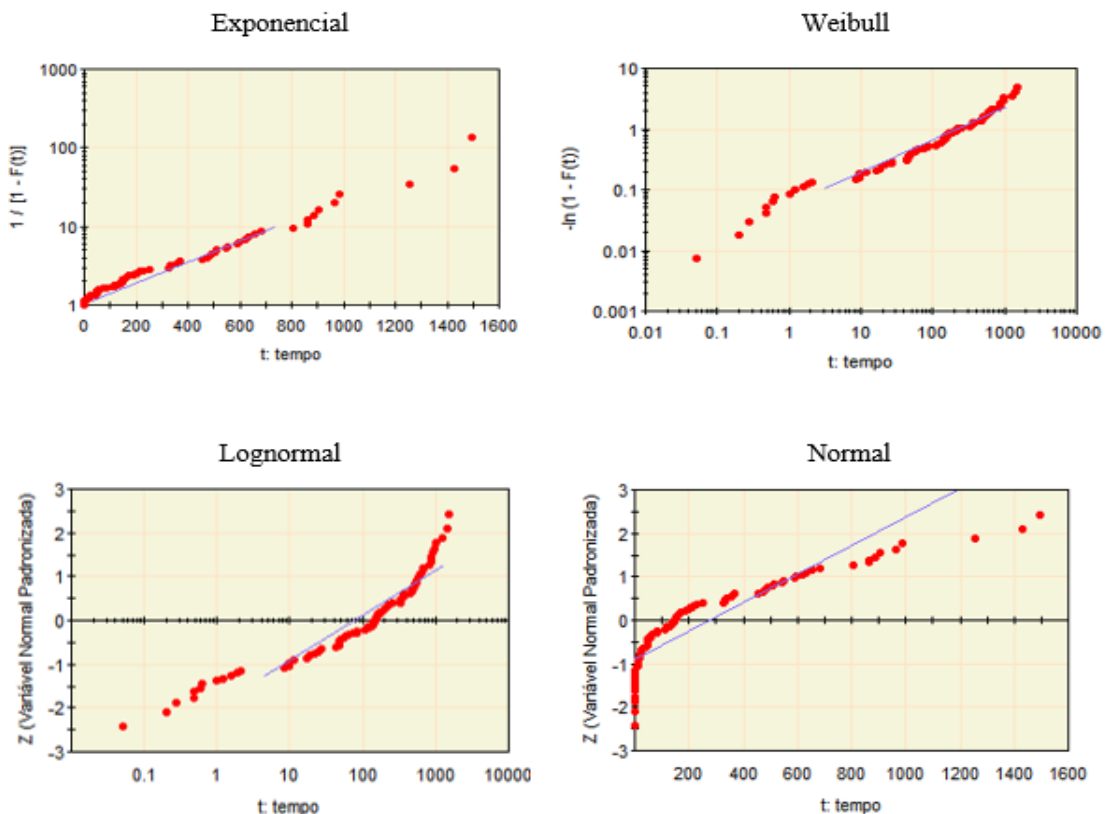


Figura 4 – Papel de probabilidade das distribuições Exponencial, *Weibull*, Lognormal e Normal.  
Fonte: ProConf

Pela análise visual dos gráficos apresentados na Figura 4, a distribuição que melhor modelou os dados foi a *Weibull*, nela os pontos estão visivelmente seguindo ao redor da reta-base, sem maiores dispersões. Entretanto, há necessidade de se validar por meio de métodos analíticos, os testes de aderência de Qui-Quadrado ( $\chi^2$ ) e de Kolmogorov-Smirnov (K-S). As significâncias desses testes são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Níveis de significância dos testes de aderência

Distribuição	Teste $\chi^2$	Teste K-S	Decisão
Exponencial	0,0084	0,0001	Rejeitada
<i>Weibull</i>	0,0529	0,096	Não pode ser rejeitada
Gama	0,018	0,1136	Rejeitada
Lognormal	0,0001	0,0001	Rejeitada
Normal	0,0001	0,0001	Rejeitada

Fonte: Adaptado do ProConf

O *software* informa o nível de significância para cada teste e aponta quais distribuições não podem ser rejeitadas. Conforme resultados da Tabela 2, a distribuição *Weibull* não pode ser rejeitada para modelar os tempos falha do turbogerador. Isso está de acordo o fato da distribuição *Weibull* ser considerada uma das mais importantes na modelagem de confiabilidade, devido à sua flexibilidade e capacidade de reprodução de amostras de tempos até a falha com comportamentos distintos (LAFRAIA, 2001). Ela também possibilita descrever as probabilidades de falhas em sistemas constituídos por vários subsistemas, que disputam pela falha geral (HAHN e SHAPIRO, 1994 apud WUTTKE e SELLITTO, 2008), como ocorre com o turbogerador em estudo.

Com a definição do modelo ajustado é possível estimar seus parâmetros ( $\gamma$  e  $\theta$  da *Weibull*), bem como outros resultados dos ajustes realizados pelo ProConf, conforme apresentados na Tabela 3.

Tabela 4 - Resultados dos ajustes

Parâmetro	Resultados
$t_{10}$ (horas)	5,48
$t_{50}$ (horas)	114,77
MTTF (horas)	299,81
$\gamma$	0,63
$\theta$	209,23

Fonte: Adaptado do software ProConf

Dos parâmetros dispostos na Tabela 4, o  $t_{10}$  e  $t_{50}$  correspondem aos valores limites de tempos em que ocorrem, respectivamente, 10% e 50% das falhas; o MTTF corresponde ao tempo médio até a falha do equipamento, apresentando um valor de 299,91 horas. Os parâmetros de forma  $\gamma$  e  $\theta$  são, respectivamente, 0,63 e 209,23. Com base nos resultados, pode-se assumir que a fase de vida do turbogerador corresponde ao início da mortalidade infantil, já que o parâmetro  $\gamma$  da distribuição de *Weibull* foi menor que 1, conforme histograma representado na Figura 2. A estratégia para esta fase é a manutenção corretiva (SELLITTO, 2005).

A função confiabilidade está representada na Figura 4. Constata-se que a confiabilidade sempre se dá em uma curva decrescente em função do tempo, já que as probabilidades de perfeitas condições decaem rapidamente, em curto intervalo de tempo.

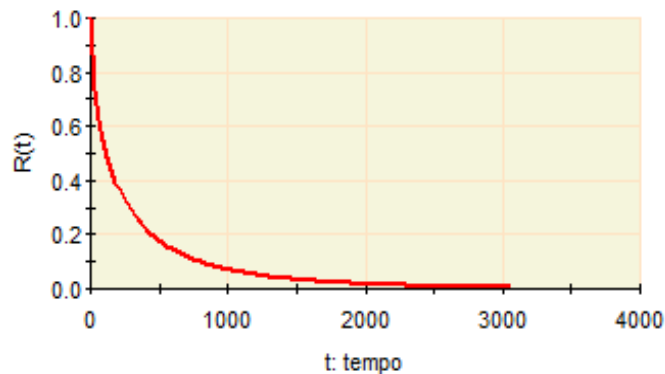


Figura 4 – Função Confiabilidade  
Fonte: ProConf

A função de risco ou taxa de falha está representada na Figura 5.

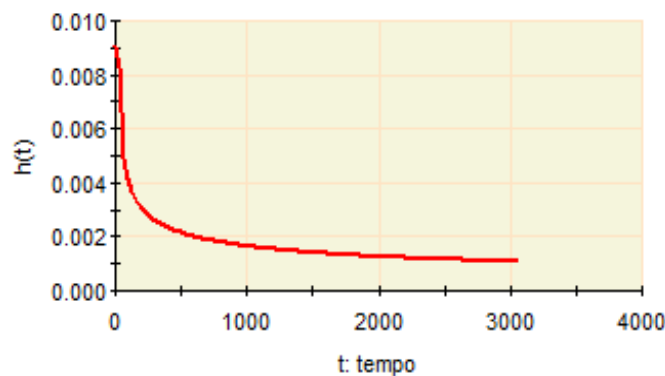


Figura 5 – Função de Risco  
Fonte: ProConf

Pode-se observar que a taxa de falha é decrescente, sendo um indicativo da mortalidade infantil do equipamento, reforçando a indicação da manutenção corretiva.

#### 4. Conclusão

A confiabilidade possui papel importante na análise do tempo de vida dos equipamentos e dos processos a eles relacionados, sendo uma ferramenta importante para definição do tipo de manutenção a ser executada.

O presente trabalho analisou o tempo de falha de um turbogerador. Por meio dos métodos analíticos e gráficos, verificou-se que a distribuição de *Weibull* modelou de forma consistente esses tempos de falha. Foi possível obter as medidas de confiabilidade, o tempo médio de parada, valores limites de tempo em que 10% e 50% das falhas ocorreram, bem como estimar os parâmetros da distribuição ajustada.

O valor do parâmetro de forma da distribuição *Weibull* obtido confirma que o equipamento se encontra na primeira fase da curva da banheira, a mortalidade infantil, indicando a execução da manutenção corretiva. Os resultados encontrados permitem a

empresa conhecer melhor o perfil das falhas do equipamento analisado, podendo se programar para sua melhor utilização.

Por fim conclui-se que a confiabilidade é de suma importância dentro de um processo industrial, pois está sempre associada a um aumento de produção, pequeno tempo de reparo e a baixos custos. As análises quantitativas das falhas são relevantes para a determinação de estratégias de manutenção a ser realizadas pelas empresas, a fim de garantir maior disponibilidade e competitividade dos produtos.

### **Referências**

**BRANDÃO, M.O.; ANDRADE, P.C.R.** *Modelagem dos dados de falhas de um pasteurizador de garrafas de cerveja*. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 10, n. 2, p. 172-181, 2018.

**CERVEIRA, D.S.; SELMITO, M.A.** *Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC): Análise Quantitativa de um Forno Elétrico a Indução*: Revista Produção Online: v.15 n.02: p405-432. Florianópolis, 2015.

**COLOSIMO, E.A.; FREITAS, M.A.** *Confiabilidade: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados*. Belo Horizonte: QFCO, 1997.

**DUEK, C.** *Análise de confiabilidade na manutenção de componente mecânico de aviação*. 2005. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

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

**FRITSCH, C.; RIBEIRO, J.L.D.** *PROCONF: um software orientado para análises de confiabilidade*. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 18, Niterói, 1998. *Anais...* Niterói, 1998.

GOMES, Milla Caroline; ANDRADE, Paulo Cesar de Resende; COSTA, Thonson Ferreira. *Análise de indicadores de desempenho da manutenção de um moinho de bolas*. Revista Thema, Pelotas, v. 15, n. 3, p. 1089 a 1103, 2018.

**GURSKI, Carlos Alberto.** *Curso de formação de operadores de refinaria: noções de confiabilidade e manutenção industrial*. Curitiba: PETROBRAS, Unicenp, 2002.

**GUTIÉRREZ, A. M.** *Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios: enfoque sistémico kantiano*. 1ª. ed. Colômbia: AMG, 2005.

**HAHN, G.; SHAPIRO, S.** *Statistical models in engineering*. New York: John Wiley & Sons, 1994.

**HAVIARAS, G. J.** *Metodologia para análise de confiabilidade de pneus radiais em frota de caminhões de longa distância*. 2009. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

**KLEMPNER, G.; KERSZENBAUM, I.** *Operation and Maintenance of Large Turbo-Generators*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

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

**LEAL, V. J.; ANDRADE, P.C.R.** *Modelagem dos dados de falha de um caminhão fora de estrada*. ForScience: revista científica do IFMG, Formiga, v. 6, n. 3, e00500, jul./dez. 2018.

**MORAES, S.** *Cogeração no Setor Sucroalcooleiro a partir do Reaproveitamento Energético da Biomassa do Bagaço de Cana*: Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2015.

**MOUBRAY, J.** *Introdução à manutenção centrada na confiabilidade*. São Paulo: Aladon, 1996.

**REIN, P.** *Engenharia do Açúcar de Cana*. Bartens, 2013.

**SANTOS, M.M.M.; SILVA, E.C.; FERREIRA, G.S.; ROSAS, R.M.G.; ANDRADE, P.C.R.** *Modelagem do tempo de vida de um inversor de frequência*. ForScience: revista científica do IFMG, Formiga, v. 5, n. 3, e00288, 2017.



**SELLITTO, M.** *Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos.* Produção, v.15, n.1, p.044-059, 2005.

**SILVA, E.C.; FERREIRA, G.S.; SANTOS, M.M.M.; ANDRADE, P.C.R.; ROSAS, R.M.G.** *Análise de Dados de Falha de um Transmissor de Fibra Óptica.* Revista Thema, Pelotas, v. 14, n. 4, p. 259-266, 2017.

**SILVA, E.M.N.; ANDRADE, P.C.R.** *Análise de confiabilidade de um inspetor eletrônico de garrafas.* Revista da Universidade Vale do Rio Verde, v. 16, n.2, p. 1-9, 2018.

**VIANA, G.O.; ROSÁRIO, D.; SOBRINHO, D.; ABREU, J.N.; EVARISTO, R.M.** *Análise da Confiabilidade de um Turbogenerador via Dados Experimentais de Tempos de Falha.* Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Curitiba, PR, v.2, n.1,35, jan. / jun., 2017.

**WUTTKE, R.A.; SELLITTO, M.A.** *Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico.* Revista Produção On Line, Santa Catarina, v. 8, n. 4, dez. 2008.