

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE UM TURBOGERADOR VIA DADOS EXPERIMENTAIS DE TEMPOS DE FALHA

ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF A TURBOGENERATOR THROUGH EXPERIMENTAL FAILURE TIMES DATA

Gilberto de Oliveira Viana¹
Dedablio Rosário²
Daniel Sobrinho³
Joel Nunes de Abreu⁴
Ronaldo Mendes Evaristo⁵

Resumo: Em um mundo globalizado a manutenção ganha destaque, ao ser responsável por sustentar a qualidade e a competitividade das indústrias. Nesse cenário, o estudo da confiabilidade de sistemas é uma importante ferramenta da manutenção industrial visto que auxilia na previsão de falhas e, conseqüentemente, no aumento da disponibilidade e produtividade dos equipamentos industriais. A utilização de distribuições de probabilidade durante esse estudo é fundamental para a elaboração de um plano de manutenção adequado para os equipamentos. Neste trabalho se mostra a validade da distribuição de Weibull na análise de dados experimentais de falhas de um turbogerador de 80MVA trabalhando em regime contínuo. Além disso, são analisadas a disponibilidade e a fase de vida do equipamento. Os resultados obtidos corroboram com pesquisas anteriores e mostram que a distribuição de Weibull é indicada para desenvolver o estudo de confiabilidade de um turbogerador. No equipamento analisado os estudos indicam que ele se encontra na fase de mortalidade infantil e tende a se estabilizar.

Palavras-chave: Manutenção Industrial. Confiabilidade. Disponibilidade. Turbogenerador.

Abstract: In a globalized world, maintenance stands out as being responsible for sustaining the quality and competitiveness of industries. In this scenario, the study of system reliability is an important tool of industrial maintenance since it assists in predicting failures and, consequently, increasing the availability and productivity of industrial equipment. The use of probability distributions during this study is fundamental for the elaboration of an adequate maintenance plan for the equipments. This work shows the validity of the Weibull distribution in the analysis of experimental data of failures of an 80MVA turbogenerator working on a continuous basis. In addition, the availability and the life stage of the equipment are analyzed. The results obtained collaborate with previous researches and show that the Weibull distribution is indicated to develop the reliability study of a turbogenerator. These studies indicate that analyzed equipment is in the stage of infant mortality and tends to stabilize.

Keywords: Industrial Maintenance. Reliability. Availability. Turbogenerator.

¹ Acadêmico de Licenciatura em Física, Instituto Federal do Paraná, *Campus* Telêmaco Borba, E-mail: gilberto.oviana@gmail.com.

² Acadêmico de Licenciatura em Física, Instituto Federal do Paraná, *Campus* Telêmaco Borba, E-mail: dw1123581321@gmail.com.

³ Acadêmico de Licenciatura em Física, Instituto Federal do Paraná, *Campus* Telêmaco Borba, E-mail: dsobrinho1977@gmail.com.

⁴ Acadêmico de Licenciatura em Física, Instituto Federal do Paraná, *Campus* Telêmaco Borba, E-mail: joel.tecmec@yahoo.com.br

⁵ Mestre em Ciências: Sistemas Eletrônicos, Instituto Federal do Paraná, *Campus* Telêmaco Borba, E-mail: ronaldo.evaristo@ifpr.edu.br

1 INTRODUÇÃO

Antigamente, as indústrias viam a função manutenção simplesmente como um departamento gerador de custos. Porém, com o crescente uso de equipamentos modernos, para aumentar a competitividade e se adequar ao processo de globalização, a manutenção passou a ser um critério para a vantagem competitiva (SIQUEIRA *apud* CERVEIRA e SELLITTO, 2015). É importante, nos processos industriais, que equipamentos críticos mantenham uma alta confiabilidade e disponibilidade (CERVEIRA e SELLITTO, 2015).

A definição de confiabilidade é dada por Fogliatto e Ribeiro (2009) como a probabilidade de que um sistema de produção opere sem apresentar falhas por um determinado tempo. A probabilidade de o reparo ser executado em um determinado tempo, desde a ocorrência da falha, é definida como a manutenibilidade ou manutenibilidade (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009). A disponibilidade, que deriva da confiabilidade e manutenibilidade, é um dos principais indicadores utilizados em manutenção (CERVEIRA e SELLITTO, 2015; FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

Um dos métodos utilizados na realização dos estudos de confiabilidade e disponibilidade é o método quantitativo (WUTTKE e SELLITTO, 2009) Nesse método é utilizado o histórico do equipamento para coletar dados e analisar o padrão de comportamento das falhas (SIQUEIRA *apud* CERVEIRA e SELLITTO, 2015). Para a análise dos dados é necessário encontrar uma distribuição de probabilidade que se ajuste aos dados de tempos do sistema em questão. As distribuições normal, lognormal, Weibull, exponencial e gamma são de interesse da manutenção (WUTTKE e SELLITTO, 2008).

O objetivo deste trabalho é demonstrar, por meio de dados experimentais, a validade das distribuições de probabilidade mencionadas, quando aplicadas na análise de tempos até a falha de um turbogerador trabalhando em regime contínuo de 24 horas. Além disso, é calculada a posição de sua vida útil na curva da banheira e sua disponibilidade.

Um turbogerador (TG) é uma máquina térmica composta por uma turbina associada a um gerador síncrono, que recebe o vapor superaquecido a alta pressão de uma caldeira, realiza trabalho, reduz a pressão e temperatura do vapor e envia para alimentar a indústria (MORAES, 2015). O vapor

movimenta o rotor da turbina, gerando a energia mecânica necessária ao gerador. A diferença de calor total entre a entrada e saída de vapor da turbina (entalpia) representa o trabalho utilizado para movimentar o gerador (REIN *apud* MORAES, 2015). As turbinas podem ser classificadas como: turbinas de contrapressão, onde o vapor de saída é utilizado no processo fabril; turbinas de condensação, quando na saída da turbina há um condensador que transforma o vapor em condensado que retorna à caldeira.

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos em uma indústria de fabricação de papel e celulose, onde o vapor utilizado nas plantas passa por turbogeradores para que a pressão e temperatura sejam reduzidas. Nesse processo, a geração de energia elétrica associada ao equipamento é um objetivo secundário. Em geral, essa energia elétrica é utilizada para compensar potência reativa na instalação elétrica e diminuir custos com a compra de energia.

Este artigo está dividido da seguinte forma: na Seção 2, são apresentados conceitos relacionadas à confiabilidade de sistemas; a Seção 3 trata da metodologia adotada; a Seção 4 é dedicada a discussão dos resultados e, por fim, na Seção 5 são traçadas as conclusões.

2 ESTUDO DE CONFIABILIDADE

2.1 Funções de Confiabilidade

Quatro funções são utilizadas para realizar e o estudo e descrever a confiabilidade. As descrições são dadas a seguir: função de confiabilidade $R(t)$ é a probabilidade de que um componente não falhe ou sobreviva até um determinado tempo; a função probabilidade de falha $F(t)$ complementa $R(t)$; a probabilidade de ocorrer uma falha entre t e $t + \Delta t$ é descrita pela função densidade de probabilidade $f(t)$; a função taxa de falha $h(t)$ é a probabilidade condicional de que se não houve uma falha no tempo t , haverá falha no período $t + \Delta t$ (LAFRAIA *apud* WUTTKE e SELITTO, 2008).

2.2 Distribuições de Probabilidade Utilizadas na Manutenção

As distribuições de probabilidade normal, lognormal, Weibull, exponencial e gamma são de grande interesse em manutenção. Wuttke e Sellitto (2008) descrevem a utilização das distribuições da seguinte forma:

A distribuição normal pode descrever tempos até falhas originadas de causas que se somam, como em britadores de martelos; a lognormal, quando a falha se origina de causas que se multiplicam, tal como em corrosão; a Weibull, quando várias causas competem e a primeira que ocorre causa a falha (sistemas série); a exponencial, quando a falha ocorre por motivos aleatórios; e a gamma, quando a última causa que ocorre dispara a falha (sistemas paralelos)

Em alguns casos o ajuste da distribuição normal se torna difícil por apresentar o valor zero em sua taxa de falha, isto é, sua aplicação se torna difícil quando o tempo se aproxima de zero (LAFRAIA *apud* WUTTKE e SELLITTO, 2008).

A distribuição de Weibull pode ser utilizada com poucas amostras, é flexível, suporta estratégias de manutenção e classifica os tipos de falha (WUTTKE e SELLITTO 2008). Essa distribuição tem como parâmetros: escala (θ), forma (γ) e tempo até falha. As equações referentes às distribuições podem ser encontradas na literatura especializada (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009; WUTTKE e SELLITTO, 2008). Neste trabalho, se destaca a distribuição de Weibull, apresentada na Equação (1).

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma}}, \quad 0 \leq t \leq \infty. \quad (1)$$

O parâmetro de forma γ expressa em que fase de vida o equipamento se encontra: caso $\gamma < 1$ o equipamento se encontra na fase de mortalidade infantil (início de vida) onde ocorrem desgastes precoces e tende a se estabilizar; $\gamma = 1$ indica que o equipamento se encontra no período de vida útil e as falhas ocorrem, geralmente, por condições extremas do ambiente; $\gamma > 1$ remete a fase de envelhecimento e deterioração (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009). Essas classificações são expressas no gráfico conhecido como curva da banheira, mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Curva da banheira.



2.3 Cálculo de disponibilidade

Em casos específicos, onde o tempo médio até a falha e a média de tempo para reparos são dados em um período de tempo finito, a disponibilidade pode ser calculada pela equação

$$DISP = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \cdot 100, \quad (2)$$

onde MTTF é o tempo médio entre as falhas e MTTR é o tempo médio para reparos.

Em casos onde se deseja extrapolar o resultado é necessário recorrer a distribuições de probabilidade e utilizar a função densidade de probabilidade $m(t)$ para encontrar o tempo médio de reparo como

$$MTTR = \int_0^{\infty} m(t) dt, \quad (3)$$

tal que, $m(t) \cdot \Delta t = P[t \leq T \leq t + \Delta t]$, sendo T é o tempo necessário para reparo a partir do instante da falha. Esse valor não é constante, mas uma variável aleatória (WUTTKE e SELLITTO, 2008).

3 METODOLOGIA

Para o estudo estatístico deste artigo foram coletados os tempos até a falha de um turbogerador com potência nominal de 80MVA, trabalhando em regime normal de operação, no período de 24 de abril de 2013 às 2h44min até 28 de outubro de 2016 às 21h59min, totalizando 30.764,45 horas. Esse

período, inclusive as horas e minutos, foram escolhidos por representarem o início e fim de um período completo de funcionamento até a falha.

Para a modelagem dos dados, cálculos e criação dos gráficos se utiliza o *software* Proconf 2000. A Tabela 1 mostra os tempos até falha coletados e a Tabela 2 mostra o tempo de reparo para cada falha, desconsiderando paradas programadas.

Tabela 1 – Tempos até falha, em horas, do TG em estudo.

n	Tempos até a falha	n	Tempos até a falha	n	Tempos até a falha	n	Tempos até a falha	n	Tempos até a falha
1	1,20	20	682,50	39	189,28	58	11,53	77	340,60
2	197,05	21	146,67	40	493,32	59	884,85	78	905,62
3	368,18	22	1,00	41	484,82	60	26,02	79	473,20
4	9,58	23	204,73	42	0,05	61	21,68	80	47,78
5	146,97	24	117,88	43	116,75	62	324,53	81	0,48
6	862,02	25	360,37	44	43,35	63	985,90	82	76,55
7	26,67	26	83,88	45	1429,68	64	455,40	83	54,53
8	506,97	27	149,85	46	0,63	65	2,07	84	46,87
9	135,63	28	150,52	47	8,30	66	1255,13	85	249,68
10	139,20	29	43,58	48	477,78	67	140,27	86	24,83
11	55,55	30	214,30	49	49,37	68	162,02	87	545,20
12	804,50	31	57,40	50	226,80	69	619,62	88	590,20
13	165,65	32	1,57	51	9,58	70	157,28	89	358,52
14	594,13	33	46,52	52	18,32	71	631,15	90	656,40
15	0,20	34	46,67	53	208,63	72	18,95	91	169,88
16	0,58	35	129,10	54	551,55	73	0,28	92	511,40
17	1,88	36	108,37	55	63,62	74	1493,08	93	334,73
18	9,55	37	151,67	56	16,65	75	863,35		
19	82,23	38	329,93	57	966,27	76	0,47		

Tabela 2 – Tempos de reparo em horas do TG em estudo

n	Tempo de Reparo	n	Tempo de Reparo	n	Tempo de Reparo	n	Tempo de Reparo	n	Tempo de Reparo
1	1,18	20	4,02	39	8,78	58	1,03	77	12,68
2	82,03	21	5,32	40	0,67	59	1,23	78	22,02
3	0,93	22	0,60	41	0,55	60	1116,12	79	24,88
4	0,57	23	16,67	42	0,92	61	0,20	80	227,08
5	5,18	24	7,35	43	0,65	62	1,27	81	0,52
6	0,82	25	1,80	44	6,90	63	1,02	82	0,48
7	18,78	26	0,60	45	6,70	64	19,50	83	1,15
8	33,17	27	1,07	46	0,97	65	0,93	84	0,68
9	19,92	28	20,48	47	1,58	66	0,87	85	0,05
10	3,30	29	20,42	48	1,00	67	1,57	86	0,43
11	1,28	30	2,75	49	0,53	68	0,52	87	38,95
12	5,35	31	0,45	50	1,53	69	0,88	88	2,10
13	7,42	32	7,68	51	1,15	70	0,57	89	2,40
14	2,55	33	3,27	52	1,80	71	13,97	90	14,90
15	0,97	34	1,10	53	0,60	72	10,70	91	37,90
16	1,60	35	3,47	54	0,82	73	1,22	92	11,85
17	5,88	36	17,4	55	63,72	74	1,53	93	13,58
18	3,08	37	0,45	56	0,08	75	12,78	94	0,45
19	2,27	38	0,58	57	0,90	76	24,62	95	0,67

Durante o período analisado, o turbogerador trabalhou 22.495,93 horas e ficou parado 5.183,32 horas. O regime diário de operação do turbogerador é de 24 horas, portanto todas as paradas foram para manutenção do equipamento. Dos tempos de parada 3.148,42 horas foram de manutenção programada.

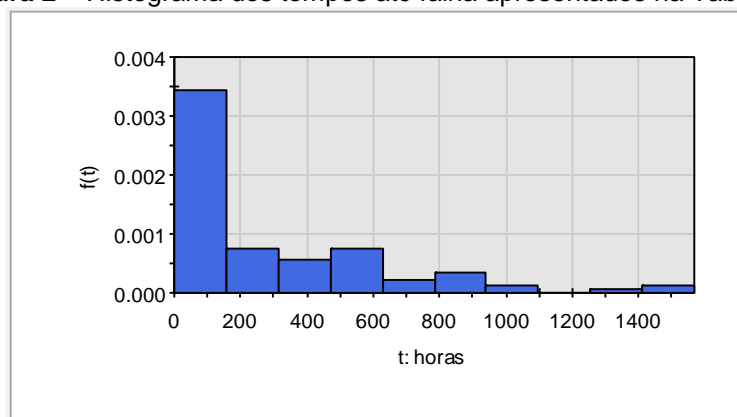
Através da interpretação dos resultados obtidos via processamento de dados foi escolhido o modelo de distribuição adequado para o estudo. Inicialmente foram processados os tempos até a falha desde o início de operação da máquina, em 2008 até o ano de 2016, porém, o elevado número de dados, incluindo intervalos muito pequenos de funcionamento e de falha, dificultaram o estudo, pois estavam computados todos os intervalos de testes e falhas externas, gerando valores atípicos (*outliers*) e distorcendo a análise do *software*. Foram testados vários períodos, incluindo o tempo até as paradas de

manutenção programadas. Todos os intervalos analisados indicavam o mesmo comportamento e levaram a mesma fase de vida do equipamento, ocorrendo apenas pequenas variações nos parâmetros dos modelos testados.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Figura 2 mostra o histograma dos tempos de falha apresentados na Tabela 1. O formato do histograma sugere a aplicação da distribuição de Weibull para os dados analisados.

Figura 2 – Histograma dos tempos até falha apresentados na Tabela 1.



A análise dos papéis de probabilidade, mostradas nas Figuras 3 a 6, indicam a distribuição de Weibull como a melhor opção, pois os dados seguem a linha de tendência, para essa distribuição, com poucos desvios. O mesmo não ocorre nas demais distribuições.

Figura 3 – Papel de Probabilidade para distribuição Weibull.

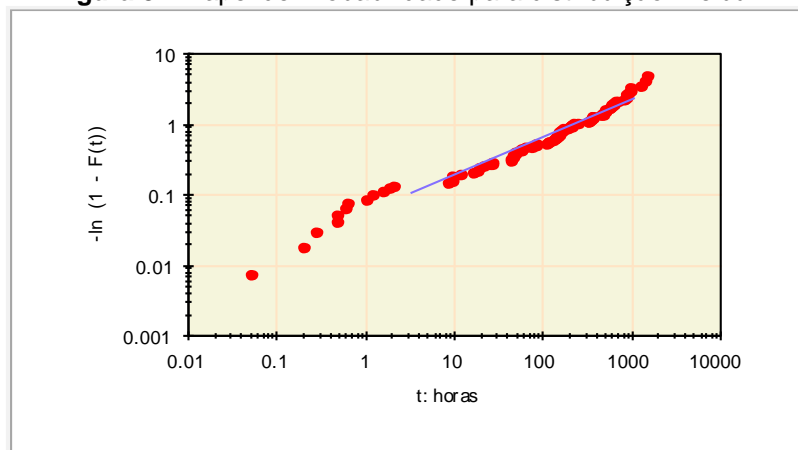


Figura 4 – Papel de Probabilidade para distribuição Exponencial.

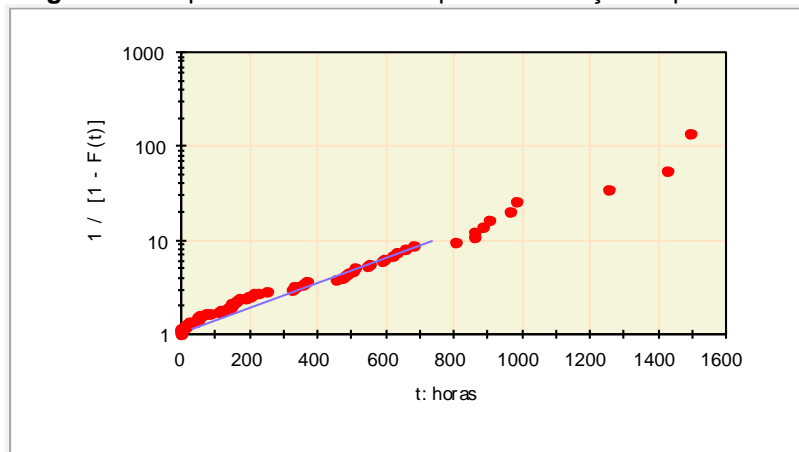


Figura 5 – Papel de Probabilidade para distribuição Lognormal.

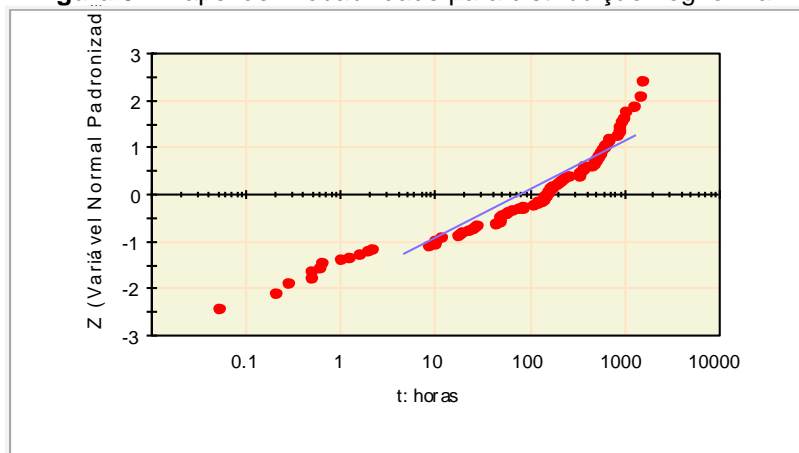
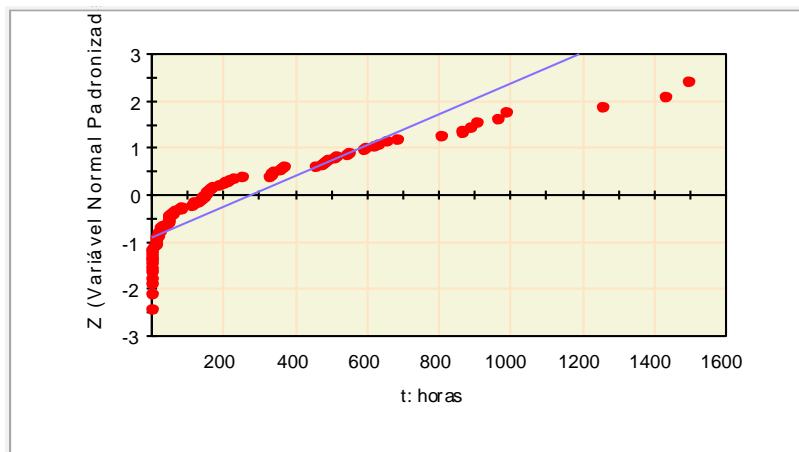


Figura 6 – Papel de probabilidade para distribuição normal.



Os testes de aderência do qui-quadrado e de Kolmogorov-Smirnov são apresentados na Tabela 3. A descrição detalhada desses testes pode ser

encontrada no trabalho de Fogliatto e Ribeiro (2009). No teste do qui-quadrado verifica-se que os valores de χ^2 é menor para a distribuição de Weibull e o nível de significância é maior, se comparado as demais distribuições. No teste de Kolmogorov-Smirnov o menor valor de DN e a maior significância foram obtidos, também para a distribuição de Weibull. Esses resultados corroboram com a análise anterior, feita nos papéis de probabilidade.

Tabela 3 – Testes de aderência para as distribuições de probabilidade estudadas.

	Teste do Qui-quadrado		Teste analítico de Kolmogorov-Smirnov	
	χ^2	Nível de Significância	DN	Nível de Significância
Weibull	13,90 com 7 graus de liberdade	0,0529	0,0848	0,0960
Exponencial	20,56 com 8 graus de liberdade	0,0084	0,1795	0,0001
Gamma	16,90 com 7 graus de liberdade	0,018	0,0827	0,1136
Lognormal	35,29 com 7 graus de liberdade	0,0001	0,1523	0,0001
Normal	163,09 com 7 graus de liberdade	0,0001	0,368	0,0001

Dessa forma pode-se afirmar que a distribuição de Weibull é a mais apropriada para o estudo da confiabilidade do turbogerador em questão e seus parâmetros ajustados podem ser utilizados durante os estudos de confiabilidade, pois os resultados dos papéis de probabilidade e testes de aderência se ajustam melhor a essa distribuição. Além disso o software Proconf 2000 já indica as demais distribuições como rejeitadas durante a análise dos dados.

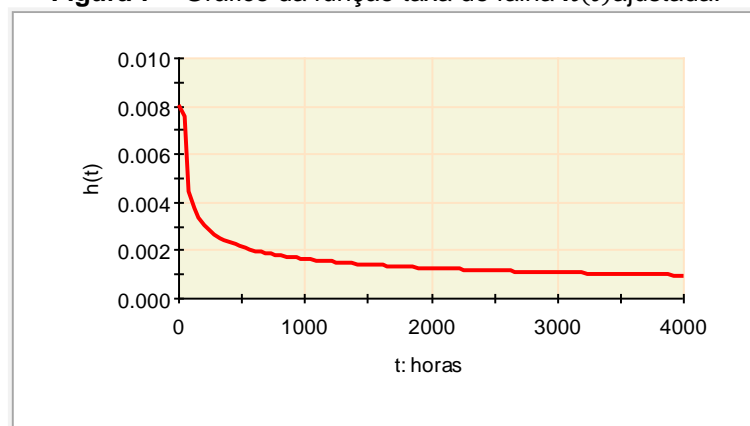
A Tabela 4 apresenta os parâmetros da distribuição de Weibull, ajustados pelos dados experimentais da Tabela 1.

Tabela 4 – Parâmetros ajustados para a distribuição de Weibull.

Modelo Weibull			
Parâmetros	Estimativas da Verossimilhança Máxima		Estimativas não tendenciosa
γ	0,6285		0,6193
θ	209,2261		207,4161
Var (γ)	0,0026		0,0026
Var (θ)	1321,508		-
Cov(θ, γ)	0,5782		-
t10	t50	MTTF	Std. Dev
5,4868	114,7723	299,8147	506,8464
95% do intervalo de segurança			
Para γ		Para θ	
0,5171 até 0,7135		144,5438 até 291,8476	

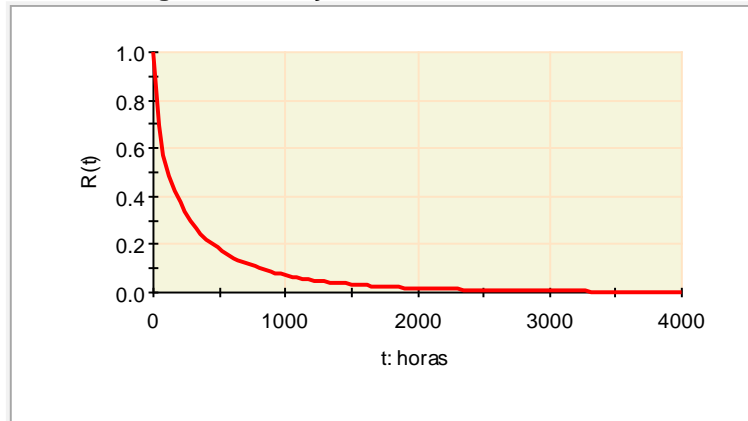
Pela Tabela 4, o tempo médio até a falha ocorrer (MTTF) no turbogerador é de 299,8147 horas. O parâmetro de forma (γ), com valor de 0,6193, mostra que a fase de vida do turbogerador se encontra na região de mortalidade infantil e tende a se estabilizar e diminuir o número de falhas. Essa característica pode ser vista comparando a função taxa de falha $h(t)$ mostrada na Figura 7 com a curva da banheira descrita na Figura 1.

Figura 7 – Gráfico da função taxa de falha $h(t)$ ajustada.



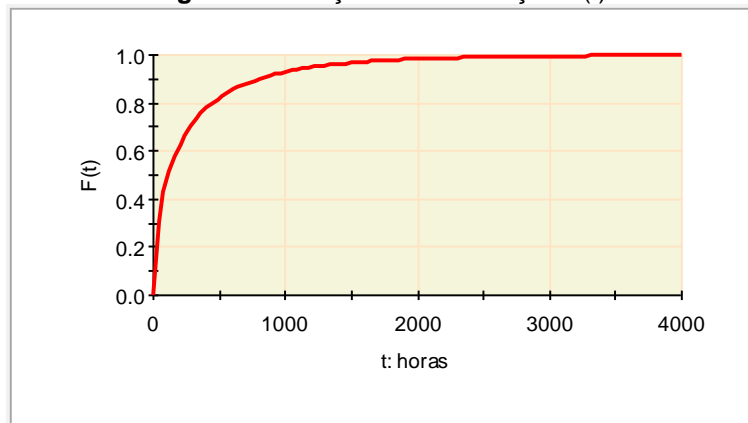
Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009) a função de confiabilidade $R(t)$ mostra a probabilidade de o equipamento não apresentar falha em um determinado período de tempo. O gráfico dessa função, obtido utilizando os dados coletados do turbogerador, é mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Função de Confiabilidade $R(t)$.



A função de distribuição $F(t)$, mostrada na Figura 9, complementa a confiabilidade e mostra a proporção de ocorrência de falhas em relação as amostras de tempo analisadas.

Figura 9 – Função de Distribuição $F(t)$.



Por fim, utilizando os dados da Tabela 2, se encontra um tempo médio de reparos (MTTR) de 21,42 horas. Utilizando essa informação associada ao valor de tempo médio até a falha (MTTF), visto na Tabela 4, se determina a disponibilidade do TG através da Equação (2). O valor obtido foi de 93,33%, que pode ser considerado um bom resultado tendo em vista o regime de operação contínuo da máquina.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muitos estudos estatísticos de manutenção e confiabilidade utilizam dados simulados de horas até a falha ou são realizados submetendo os

equipamentos a um regime de estresse para estimar sua vida útil. Nesse trabalho foram utilizados dados reais com a máquina em regime normal de trabalho, tornando possível verificar, através da análise estatística, que os dados corroboram para o uso de distribuições já conhecidas.

Durante a pesquisa foram lançados dados de tempo até a falha, desconsiderando as manutenções programadas. Também foram utilizados períodos diferentes de tempo de operação da máquina desde a implantação. Em todos, os comportamentos dos gráficos mostram que a distribuição de Weibull se adequa melhor aos dados. Considerando os tempos de funcionamento até a parada de manutenção programada, uma das análises mostrou que além da distribuição de Weibull a distribuição Gama também poderia ser utilizada. Em nenhum momento foi encontrado um comportamento que evidencia o uso da distribuição Normal ou Gaussiana, corroborando com as pesquisas anteriores e com a literatura que afirmam que as distribuições de Weibull, Lognormal e Gama são as mais recomendadas para análise de confiabilidade e manutenção.

O valor do parâmetro forma da distribuição de Weibull obtido mostra que o comportamento do turbogerador se localiza na primeira fase da curva da banheira, tendendo a uma estabilidade de funcionamento e diminuição de quebras. A interpretação dos dados nos gráficos da função de confiabilidade e função de densidade acumulada mostra a importância de um plano de manutenção em determinados períodos para evitar a ocorrência de falhas.

Além disso, apesar da disponibilidade encontrada de 93,33% os parâmetros de MTTF, os valores da função de sobrevivência e distribuição podem ser considerados baixos, pois não foram considerados os modos de falha separadamente.

Por fim, considerando que o equipamento se encontra no início da curva da banheira, significando que sua sobrevivência e MTTF tendem a aumentar, concluímos que os resultados obtidos estão em consonância com o apresentado na literatura e podem ser utilizados em estudos teóricos posteriores.

REFERÊNCIAS

- CERVEIRA, Diego S; SELLITTO, Miguel 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.
- FOGLIATTO, Flavio S.; RIBEIRO, Luiz D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**: 1º ed: Campus: Rio de Janeiro, 2009.
- LAFRAIA, J. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- LEÃO, Natália S.M.; ANDRADE, José de O. **Aplicação da FMEA e Análise de Falhas em um Equipamento de Trefilagem para estabelecimento de Estratégias de Manutenção: Estudo de Caso** Revista Espacios: v.36 n.08: p405-432. Caracas, 2015
- MORAES, Scarlett O'hara de O. **Cogeração no Setor Sucroalcooleiro a partir do Reaproveitamento Energético da Biomassa do Bagaço de Cana**: Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2015
- REIN, P. **Engenharia do Açúcar de Cana**. Bartens, 2013.
- SIQUEIRA, I. **Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implementação**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009..
- WUTTKE, Régis A; SELLITTO, Miguel A. **Cálculo da Disponibilidade e da Posição na Curva da Banheira de uma Válvula de Processo Petroquímico** Revista Produção Online: v.08 n.04: p405-432. Florianópolis, 2008

Enviado em: 9 dez. 2016

Aceito em: 16 mai. 2017

Editores responsáveis: Mateus das Neves Gomes