Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Faculdade de Engenharia de Bauru

RELATÓRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

Estudo da Distribuição Exponencial na Teoria de Confiabilidade

Aluno: José Sérgio Spernega Cota
Curso: Engenharia de Produção - FEB/Unesp

Orientadora
Profa. Dra. Gladys Dorotea Cacsire Barriga
Departamento de Engenharia de Produção - FEB/Unesp

Bauru, 2015

Resumo

A competitividade é uma característica marcante do mercado atual. A fim de se destacarem, empresas e indústrias investem na qualidade de seus produtos, sendo que muitas delas abordam métodos estatísticos, como o uso da distribuição exponencial na teoria de confiabilidade, que é o objeto de estudo desta pesquisa, a qual pretende mostrar a importância da aplicação deste modelo. Será realizado um estudo teórico sobre a distribuição exponencial em todos seus aspectos (origem, características, propriedades) e também suas aplicações práticas no ramo da engenharia de produção, principalmente ligadas ao controle e melhoria da qualidade e na teoria de confiabilidade, através da análise de um conjunto de dados, pesquisas e bibliografias relacionadas.

Palavras chave: Distribuição Exponencial; Qualidade; Confiabilidade.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO

Uma importante característica do modelo econômico atual é a competição. Empresas privadas vivem em constante competição com a concorrência a fim de desenvolverem bens e serviços que agradam cada vez mais o consumidor, tentando, dessa maneira, se sobressair no mercado competitivo. Um dos fatores mais relevantes para a decisão do consumidor é a qualidade do produto e do serviço. (Montgomery, Douglas C., 2004). Portanto, há grande investimento por parte das empresas no desenvolvimento de técnicas e métodos que visam à melhoria da qualidade. Existem diversos modelos e teorias estatísticas que conseguem prever erros de produção e defeitos num produto.

Segundo Cristiano Osaki (2001), "é possível definir com precisão o conceito estatístico de confiabilidade como a probabilidade de que um componente ou sistema funcionando dentro dos limites especificados de projeto, não falhe durante o período de tempo previsto para a sua vida, dentro das condições de agressividade ao meio".

Consumidores optam por companhias que oferecem produtos confiáveis, que não falham durante a utilização. Portanto, a confiabilidade é de extrema importância para marcas que querem competir no mercado com produtos de qualidade e alto valor agregado. (COLOSIMO & HUDSON, 2002)

Empresas grandes costumam realizar o estudo da confiabilidade na fase inicial do projeto, pois assim, podem prever falhas e, embora exija um maior investimento inicial, minimizar a possibilidade de um prejuízo maior, sendo também possível aperfeiçoar a validade do produto ou, em cenário pessimista, realizar uma coleta de dados quando o produto retornar ao fabricante com falha, que adequadamente registradas e processadas geram parâmetros de confiabilidade sem gerar custos excessivos. A monitoração desses parâmetros permite visualizar problemas precocemente, prever gastos futuros, dimensionar estoques e equipe de manutenção e alimentar a área de pesquisa e desenvolvimento (P&D) com informações úteis para o aprimoramento futuro. (MEEKER & HAMADA, 1995)

Há diversas ferramentas estatísticas de distribuição utilizadas na confiabilidade, como as distribuições: de Gauss, Log-Normal, de Weibull e a Exponencial. Dentre todas as ferramentas citadas, nesta pesquisa só será estudada a distribuição exponencial, suas aplicações e a importância para a confiabilidade. As aplicações, basicamente, são: em falhas de equipamentos com mais de 200 componentes sujeitos a mais de três manutenções corretivas; sistemas complexos não redundantes; sistemas complexos com componente com taxas de falhas independentes; sistemas com dados de falhas mostrando causas muito heterogêneas; sistemas de vários componentes, com substituições antes de falhas devido à manutenção preventiva. (OSAKI, C., 2001)

2. CONCEITOS BÁSICOS

2.1. VARIÁVEIS ALEATÓRIAS CONTÍNUAS

Dado um intervalo de números reais, as variáveis que podem assumir um número infinito de valores naquele são denominadas aleatórias contínuas. Altura, salário, renda, área e tempo de falha de um equipamento, por serem resultados de mensuração podendo assumir qualquer valor real num intervalo observado, são exemplos de variáveis aleatórias contínuas. (BUSSAB, W. 1987)

Por não ser possível listar a probabilidade de todos os valores do intervalo, constrói-se uma função densidade de probabilidade baseada na função *f(x)* correspondente, a qual deve satisfazer duas condições:

i) $f(x) \geq 0 \;\; \forall \, x \; \in \; \mathbb{R}$

ii) $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$

Para todo valor de X pode ser associada uma função densidade de probabilidade *f(X)*, tal que:

$$f(X) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{P[x < X \leq x + \Delta x]}{\Delta x} \qquad \text{(LEITE, A., 2005)}$$

O cálculo da probabilidade de um intervalo [a, b] se dá pela área sob a função *f* no mesmo intervalo, ou seja:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_{a}^{b} f(x)dx$$

É importante observar que se tratando de uma variável aleatória contínua a probabilidade de ocorrência de um único valor é sempre zero, isto é, $P(X = x) = 0$.

A função de distribuição acumulada de uma v.a.c. *X* com f.d.p. *f(x)* é dada por:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(y)dy = P(X \leq x), \forall x \in \mathbb{R} \qquad \text{(WERNER, L. 1996)}$$

Suas principais propriedades são:

$F(-\infty) = 0$

$F(+\infty) = 1$

2.1.1. MEDIDAS DE POSIÇÃO

Considerando X uma v.a. da função *f(x)*, os pontos a e b, sendo que $h=b-a$ assume um valor pequeno, e x' como ponto médio do intervalo $[a, b]$. A probabilidade de ocorrer um valor X no intervalo [a, b] com h tendendo a zero pode ser calculada pela aproximação da área de um retângulo de base h e altura $f(x')$, ou seja,

$$P(a \leq X \leq b) \cong hf(x').$$

Depois dividindo o intervalo onde a função f é positiva em n partes iguais e considerando os pontos médios desses intervalos, $x_1, x_2,...,x_n$. E considerando a v.a. Y_n assumindo os valores dos pontos médios dos intervalos com as probabilidades:

$$p_i = P(Y_n = x_i) \cong f(x_i)h.$$

Assim, e de acordo com a definição de esperança, tem-se a aproximação do valor médio E(X), dada por:

$$E(Y_n) = \sum_{i=1}^{n} x_i p_i \approx \sum_{i=1}^{n} x_i f(x_i)h$$

A fim de obter um valor médio com maior precisão, diminui-se a amplitude de h, e calcula-se o limite de $E(Y_n)$ quando h tende a zero ou n tende a infinito. Portanto:

$$E(X) = \lim_{n\to\infty} E(Y_n) = \lim_{n\to\infty} \sum_{i=1}^{n} x_i f(x_i)h$$ (OSAKI, C. 2001)

A mediana é o valor *Md* que possui a seguinte propriedade:

$$P(X \geq Md) \geq 0{,}5 \quad \text{e} \quad P(X \leq Md) \geq 0{,}5$$

A moda (*Mo)* é o valor máximo da função densidade, não sendo, necessariamente, única:

$$f(Mo) = \max_x f(x)$$

A variância é dada por:

$$Var(x) = \sigma^2(x) = E\left[\left(X - E(X)\right)^2\right] = \int_{-\infty}^{\infty} \left(x - E(X)\right)^2 f(x)dx$$

E o desvio padrão:

$$DP(X) = \sigma(X) = \sqrt{Var(x)}$$ (MAGALHÃES, M. 2005).

2.2. MAXIMA VEROSSIMILHANÇA

A partir de um conjunto de dados e de um modelo estatístico é possível estimar os valores de diferentes parâmetros do modelo através do método de máxima verossimilhança, originalmente formulado por Fisher (1929), o qual toma uma amostra da população observada e a partir dela busca valores para os parâmetros a fim de maximizar a probabilidade dos dados, ou seja, procura valores que maximizam a função de verossimilhança.

É comumente usado para os diferentes aspectos da inferência estatística (estimação e teste de hipótese) por produzir estimadores com boas propriedades assintóticas, consistentes e eficientes.

2.2.1. MÉTODO DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA (MMV)

Dada certa amostra aleatória (y_1,y_2,...,y_n) de uma população com f.d.p $f(y;\theta)$, sua função densidade de probabilidade conjunta é dada pelo produto das densidades de cada uma das observações, onde y é uma variável aleatória e θ é um vetor de parâmetros:

$$\prod_{i=1}^{n} f(y_i\,;\theta)$$

Uma vez que se conheça a amostra obtida, y_i assume um valor fixo e, em contrapartida, o vetor paramétrico θ se torna uma variável o que possibilita reinterpretar a função densidade de probabilidade como sendo uma função do vetor de parâmetro θ, a qual é denominada de função de verossimilhança.

$$L(\theta;y) = \prod_{i=1}^{n} f(\theta_i\,;y)$$

A estimação do parâmetro consiste em obter-se o vetor θ_1 que maximiza esta função, ou seja, é o estimador que faz com que:

$$L(\theta_1;y) > L(\theta_2;y),$$

Onde θ_2 é qualquer outro estimador.

Os estimadores de máxima verossimilhança possuem boas propriedades, que faz o MMV ser o método de estimação mais utilizado, pois são: consistentes; apresentam distribuição assintoticamente normal; são assintoticamente não tendenciosos; e assintoticamente eficientes.

O MMV, por ser um processo de otimização, possui alguns aspectos que são relevantes durante sua implementação. Por exemplo: a solução pode ser tanto numérica quanto analítica, sendo uma maior ocorrência da forma numérica, e que a forma analítica pode não existir; duas verossimilhanças proporcionais produzem o mesmo estimador, ou seja, constantes da função *f(y)* que não dependem do parâmetro podem ser descartadas; pode-se aplicar a log-verossimilhança ao invés da verossimilhança.

Mesmo o MMV sendo um dos métodos mais precisos de estimação paramétrica, deve-se levar em consideração algumas dificuldades dessa metodologia, pois, depende de cálculos não triviais, geralmente necessita de uma população específica, possui propriedades válidas para grandes amostras que podem não ser válidas para pequenas, e nem sempre é possível se obter um estimador de máxima verossimilhança.

3. DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL

A distribuição exponencial tem grande importância na engenharia, principalmente nos setores de qualidade, onde, entre todas as distribuições é a mais simples e utilizada no estudo de sobrevivência. A fim de entender como é aplicada a distribuição exponencial, em modelo de falhas, é necessário a compreensão prévia da distribuição de Poisson. (LARSON, R., 2004)

A distribuição exponencial define como a variável aleatória x a distância entre contagens sucessivas de um processo de Poisson com parâmetro λ, e sua função densidade de probabilidade (f.d.p.) é:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & se\ x \geq 0 \\ 0 & ,\ se\ \ x < 0 \end{cases}$$

É graficamente representada pela Figura 1:

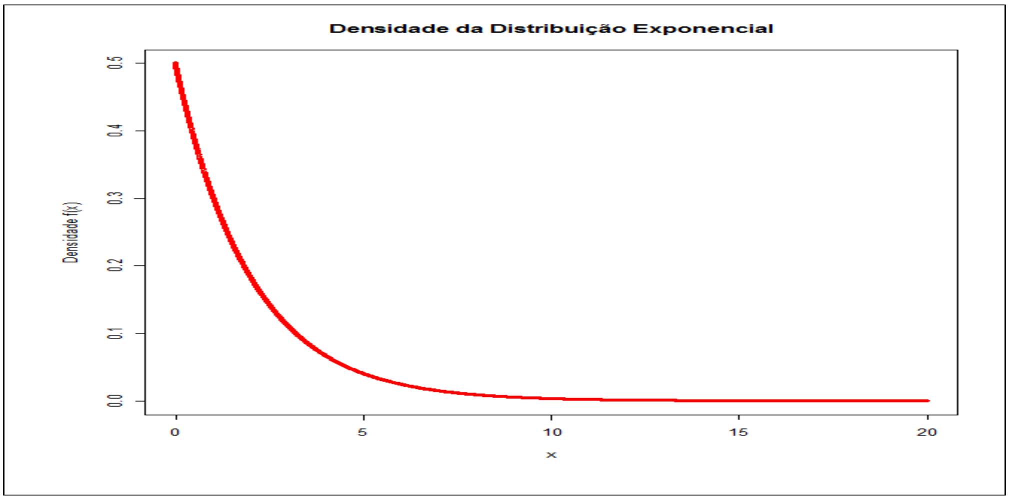

Figura 1: Densidade da distribuição exponencial.

A função distribuição acumulada é definida por:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x}, se\ x > 0 \\ 0 \qquad\quad , se\ x \leq 0 \end{cases}$$

E a função de sobrevivência é dada por:

$$S(x) = e^{-\lambda x} \quad para\ x \geq 0$$

A taxa de risco é uma constante (λ), sendo que quando possui um valor alto indica uma pequena sobrevivência, e quando é baixo, o contrário. A função de taxa de risco é descrita por:

$$h(x) = \lambda \;\; para\; x \geq 0$$

E a função acumulada da taxa de risco é:

$$H(x) = \lambda x$$

O valore esperado $[E(x)]$, e a variância $[Var(x)]$ da distribuição exponencial são dadas por:

$$E(x) = \frac{1}{\lambda}$$

$$Var(x) = \frac{1}{\lambda^2}$$

A probabilidade da exponencial é a área abaixo da curva da função exponencial no intervalo desejado:

$$P(a < x < b) = \int_a^b \lambda\, e^{-\lambda x} dx$$

As funções descritas acima podem ser representadas graficamente.

Uma variável aleatória exponencial apresenta uma propriedade muito importante, a propriedade de Falta de Memória. Esta consiste no fato de que a probabilidade de um evento ocorrer num determinado intervalo é sempre igual. Por exemplo, a probabilidade de um evento ocorrer na primeira hora da contagem é igual à probabilidade do evento ocorrer num intervalo de uma hora após cinco horas do início da contagem, independente do que tenha ocorrido antes. (MONTGOMERY, D. 2009)

Em linguagem matemática:

$$P(x < t_1 + t_2 | x > t_1) = P(x < t_2).$$

4. CONFIABILIDADE

4.1. DEFINIÇÕES

Neste subcapítulo serão apresentados conceitos importantes para o entendimento da teoria da confiabilidade, tal como as definições de qualidade, garantia, falha e confiabilidade.

4.1.1. QUALIDADE

A qualidade de um produto ou serviço é um fator primordial para uma empresa se sobressair na concorrência do mercado. Isto porque a qualidade é o diferencial que determina a escolha do consumidor, que prefere os produtos e serviços mais qualificados.

Existem diferentes definições para o significado de qualidade, Crosby e Oakland (1994) definem a qualidade de maneira bem parecida, para o primeiro, qualidade é a "conformidade com as exigências", e para o segundo, é "o atendimento das exigências do cliente". Feingenbaum dá uma explicação um pouco mais completa, para ele qualidade é o "total das características de um produto e de um serviço referentes a marketing, engenharia, manufatura e manutenção, pelas quais o produto ou serviço, quando em uso, atenderá às expectativas dos clientes".

Apesar de serem definições escritas de forma distintas, todas convergem para o mesmo ponto: acatar as exigências do consumidor. Deste modo o planejamento da qualidade deve priorizar as necessidades do cliente, ouvindo a "voz do cliente", simulando a introdução do novo produto/serviço e analisando os impactos, definindo setor de mercado, público alvo, demanda e preço. E a partir dessas informações, gerar dados que devem ser quantificados a fim de serem introduzidos no projeto de desenvolvimento do produto. (TEIXEIRA, C., 2004)

4.1.2. GARANTIA

Para agradar o consumidor favorecendo-o no processo de decisão e assim se destacar no mercado, um fabricante além de fornecer um produto de qualidade deve também garantir ao cliente que seu produto é de qualidade, assumindo a responsabilidade de em caso de falhas no produto antes do prazo de garantia determinado, o mesmo poderá ser reposto ou reembolsado ao consumidor.

Em geral, a determinação do prazo de garantia de um produto é calculada previamente por modelos probabilísticos dos tempos de falha ao longo do período de uso, ou seja, o prazo de garantia nada mais é do que o tempo de vida do produto até a ocorrência de falhas. Dentre os modelos estatísticos utilizados para tal fim temos as medidas de confiabilidade. (WERNER, L. 1996)

4.1.3. FALHAS

Quando há alteração ou interrupção no desempenho de um componente ou sistema impedindo que executem seu propósito, dizemos que houve a ocorrência de falhas. Estas falhas podem ser causadas por mecanismos de falhas como um conjunto processos químicos e físicos, sendo que os modos de falhas referem-se ao modo de como a falha se manifesta.

Siqueira (2009) classifica as falhas quanto a sua origem, extensão, velocidade, manifestação e idade. Estas classificações são mais específicas para a análise de falhas dando uma maior base para a decisão de qual método de resolução e prevenção de falhas deve-se aplicar. Podemos classificar os tipos de falhas de modo mais geral, que são os três tipos básicos: falhas precoces; falhas casuais; e falhas por desgaste.

Falhas precoces geralmente são causadas por uso intenso ou em condições não recomendáveis, erros na fabricação e/ou no projeto. Podem ser detectadas mediante rigoroso controle na fabricação e testes. As falhas casuais ocorrem no que chamamos de vida útil do produto, ou seja, elas ocorrem de maneira aleatória e inesperada durante o período de tempo em que o fabricante garante a satisfação do produto, o que faz com que seja o tipo de falha mais difícil de evitar. Falhas por desgaste são falhas naturais que ocorrem devido ao envelhecimento e desgaste do produto, pode-se atrasar a falha efetuando manutenções preventivas.

Os tipos básicos de falhas podem ser representados graficamente pela Curva da Banheira (**Figura 2**). (MATOS & ZOTTI, 2010)

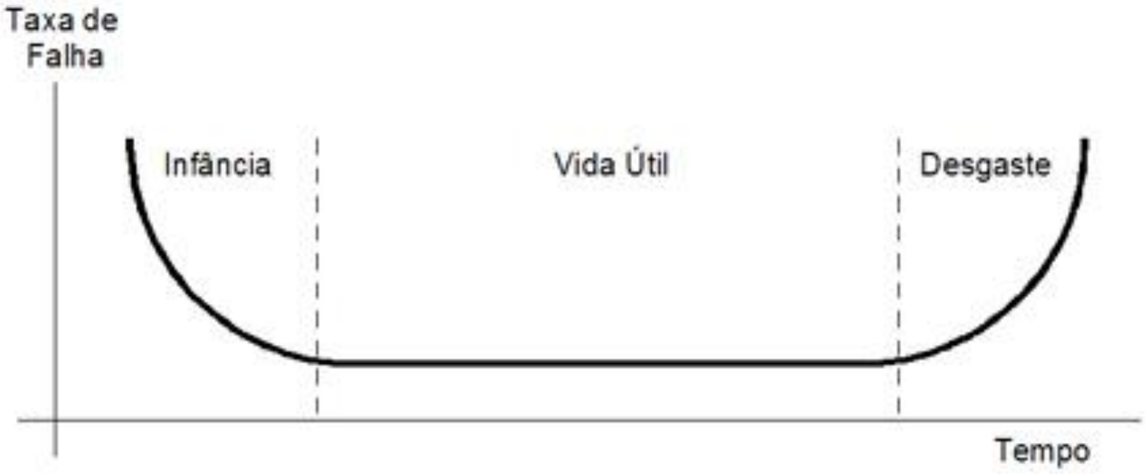

Figura 2: Curva da Banheira.

4.1.4. CONFIABILIDADE

De acordo com a definição da ABNT, confiabilidade é a “característica de um item eventualmente expressa pela probabilidade de que ele preencherá uma função dada, sob condições definidas por um período de tempo definido”, ou seja, num tempo de vida previamente determinado de um produto ou sistema qualquer, confiabilidade é a probabilidade de não ocorrência de falhas nesse período. Através de ferramentas como a estatística, teoria das probabilidades e de dados experimentais a confiabilidade permite a elaboração de regras que preveem a probabilidade de ocorrência de falhas, garantindo o funcionamento satisfatório de um sistema. (TEIXEIRA, C., 2004)

A análise de confiabilidade de um produto é dependente do projeto de engenharia e dos processos produtivos, assim como do modo de utilização do produto, e não se podem descartar eventos aleatórios. Aumentar a confiabilidade de um produto pode envolver diversas atividades, que muitas vezes aparentam ser complexas, como a modificação de processos e materiais e até mesmo a reformulação do projeto. Na análise de confiabilidade de um sistema deve-se ter conhecimento de um conjunto de suposições e condições limitantes, como: as partes do sistema incluídas na análise; os objetivos da análise; as interfaces a serem utilizadas;

nível de detalhamento exigido; fatores de stress que devem ser considerados; e as condições ambientais a qual o sistema esta inserido. (SANTOS, G. 2009)

Os resultados da análise de confiabilidade são de extrema importância para o processo produtivo, pois são informações de entrada para o auxílio na tomada de decisões administrativas e produtivas, podendo ser aplicadas em diversas áreas, como na análise de riscos, a identificação e descrição de acidentes potenciais internos de um sistema, e principalmente na otimização da manutenção e operação de equipamentos.

A teoria da confiabilidade usa como ferramentas a estatística matemática, o conhecimento experimental das causas de falhas, regras e estratégias para melhorar o desempenho de sistemas de várias naturezas e técnicas para o desenvolvimento de sistemas. Dentre essas ferramentas, será abordada apenas a estatística matemática neste trabalho, mais especificamente a distribuição exponencial.

Em estudos de confiabilidade a variável aleatória utilizada é, geralmente, o tempo de vida de determinado item, desempenhando uma função de probabilidade de falha em função do tempo. No tempo inicial (t=0), quando o componente começa a funcionar, a probabilidade de falhas é nula, e para tempos longos, onde $t \rightarrow \infty$, a probabilidade de falha é igual a 1. A função acumulada de falha, ou função de falha Q(t) é:

$$Q(t) = P(X \leq t)$$

A função de confiabilidade ou função de sobrevivência R(t) é dada pelo complemento de Q(t), ela representa a probabilidade de um componente sobreviver até o tempo t:

$$R(t) = 1 - Q(t)$$

$$R(t) = P(X > t)$$

Derivando a função de falha, encontramos a função densidade de falha f(t):

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d[1 - R(t)]}{dt} = \frac{dR(t)}{dt}$$

A função taxa de risco, muito importante para a teoria da confiabilidade, representa a densidade da probabilidade do item sofrer uma falha no instante t, haja vista que ele operou até este tempo. A função taxa de risco [λ(t)] é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{Probabilidade\ de\ falha\ no\ intervalo\ [t, t + \Delta t] dado\ que\ não\ falhou\ antes\ de\ t}{\Delta t}$$

Assumindo um intervalo $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[t < X \leq t + \Delta t | X > t]}{\Delta t}$$

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{P[(t < X \leq t + \Delta t) \cap (X > t)]}{P[X > t]}$$

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{P[t < X \leq t + \Delta t]}{P[X > t]}$$

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

Sabemos que $f(t) = \frac{dR(t)}{dt}$, portanto:

$$\lambda(t) = \frac{-1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$$

Integrando a equação podemos obter R(t) em função de $\lambda(t)$:

$$\int_{1}^{R(t)} \frac{dR(t)}{R(t)} = -\int_{0}^{1} \lambda(s) ds$$

$$\ln R(t) = -\int_{0}^{1} \lambda(s) ds$$

$$R(t) = e^{-\int_0^1 \lambda(s) ds}$$

Se considerarmos λ(t) constante para todo t, obtemos:

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

$$R(t) = 1 - e^{\lambda t}.$$ (LEITE, A., 2005)

5. METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia aplicada nesta pesquisa iniciou-se com um levantamento de referências teóricas publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas de web sites com o objetivo de recolher informações ou conhecimentos prévios sobre a distribuição exponencial e suas aplicações na área de qualidade e confiabilidade. Além disso, foram estudadas as aplicações da distribuição exponencial na teoria da confiabilidade através de dados coletados, e a partir deles, inferiram-se os resultados obtidos pela análise de confiabilidade. Para a coleta de dados a metodologia de pesquisa utilizada foi uma pesquisa quantitativa com procedimento experimental que consiste em determinar o objeto de estudo, identificando as variáveis que podem influenciá-lo, e por meio de testes, observar os efeitos causados no objeto de estudo. Deste modo, para a coleta de dados, foram realizados testes em uma máquina de solda a plasma (MIG PULSE 3001 DP - CASTOLIN EUTECTIC) com arame E701R, guiada por um braço robótico (MOTOMAN UP6), pertencente ao SENAI de Lençóis Paulista. O teste consistiu em 30 repetições de um processo de soldagem de chapas de metal USISAC 300 de perímetro 187 mm. A máquina operou na seguinte configuração: MIG tradicional; vazão de gás de 13L/min; corrente efetiva de 159,85A; tensão efetiva de 23,5V; potência de 2,85KW; velocidade do arame de 6,8m/min; e velocidade de soldagem de 10 mm/s. Os testes dedicaram-se à averiguação das taxas de falha da máquina, em que cronometramos cada processo de soldagem e identificamos visualmente os que ocorreram alguma falha. Com os dados coletados aplicamos a teoria da distribuição exponencial a fim de analisar a confiabilidade da máquina.

6. ANÁLISE DOS RESUSTADOS (AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE UM EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM)

A partir dos testes realizados construiu-se a **Tabela 1** com os tempos de cada processo de soldagem e a identificação, pelo número 1, de quais testes houve qualquer tipo de falha. Dos 30 testes efetuados, oito apresentaram alguma falha, o equivalente a 26,67%. Vale ressaltar que previamente já haviam sido realizados testes para determinar a configuração ideal da máquina.

Para a detecção visual de falhas, foram observadas as principais e mais usuais falhas que ocorrem na solda, sendo elas: abertura do arco; instabilidade do arco; excesso de respingos; mordedura; e porosidade. Dentre os oito processos em que houve falhas, identificamos a ocorrência de porosidades e mordeduras, principalmente.

A porosidade no cordão de solda ocorre, principalmente, por sujeiras, oxidação ou umidade da peça, alta velocidade de soldagem e alto comprimento do arco elétrico. A mordedura, por sua vez, pode ocorrer devido à alta velocidade de soldagem, alta corrente, comprimento do arco elétrico alto e umidade do eletrodo. (SANCHES, R., 2010)

Teste	Tempo inicial (s)	Tempo final (s)	Falha
1	00:00	21,84	1
2	00:00	22,24	0
3	00:00	21,2	0
4	00:00	21,44	0
5	00:00	21,07	1
6	00:00	21,37	1
7	00:00	21,41	0
8	00:00	21,06	0
9	00:00	21,27	0
10	00:00	21,31	1
11	00:00	21,22	0
12	00:00	21,25	0
13	00:00	20,5	1
14	00:00	21,61	0
15	00:00	19,69	1
16	00:00	25,16	0
17	00:00	24,53	0
18	00:00	19,76	0
19	00:00	18,81	0
20	00:00	18,83	0
21	00:00	19,21	0
22	00:00	19,21	0
23	00:00	19,18	0
24	00:00	20,11	1
25	00:00	20,07	1
26	00:00	19,03	0
27	00:00	19,45	0
28	00:00	19,12	0
29	00:00	19,19	0
30	00:00	19,44	0

Tabela 1: Resultado dos 30 testes efetuados na máquina de solda.

Tempo (t)	R(t)
10	89%
20	77%
40	60%

Tabela 2: Estimativa de máxima verossimilhança de R(t), para t=10,20 e 40.

A figura 3, obtida durante os testes, mostra uma peça com falha na solda (à esquerda) e uma peça com a solda ótima (à direita), respectivamente.

Figura 3: solda com falha (à esquerda); solda ótima (à direita).

Os dados obtidos foram ajustados para o modelo exponencial, e através do software estatístico "R" foi possível realizar a estimativa de máxima verossimilhança que resultou num parâmetro λ=0,013 com tempo médio de falha igual a 77,45 segundos. A partir disso determinamos a função de confiabilidade: $R(t) = e^{-0,013t}$.

Da função de confiabilidade encontrada estimamos a porcentagem de chapas que não apresentaram falhas até o tempo t (em segundos), e representamos na **Tabela 2**.

Através da estimativa de máxima verossimilhança de R(t) foi possível fazer uma representação gráfica referente à função de confiabilidade encontrada. (Figura 4)

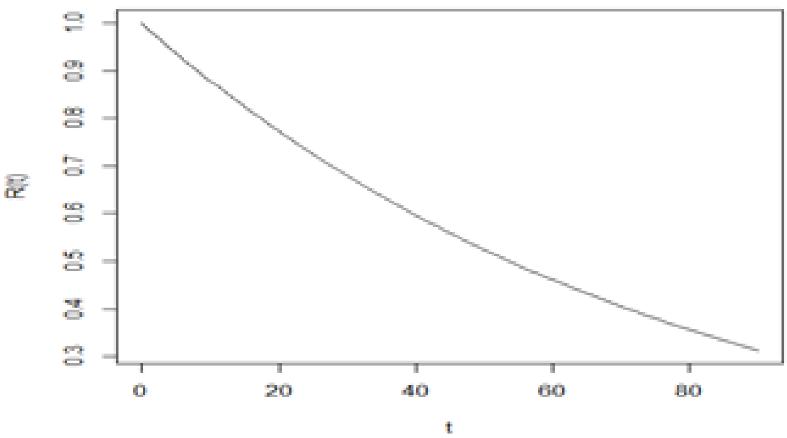

Figura 4: Estimativa de máxima verossimilhança da R(t) para os dados coletados

7. CONCLUSÃO

Da presente pesquisa podemos concluir, através da revisão bibliográfica, que de fato a confiabilidade e a qualidade dos produtos e serviços é de extrema importância para uma empresa que quer se manter e se destacar no mercado, e o oferecimento, aos consumidores, de bens com pouca ou nula taxa de falha no período de garantia é uns dos fatores de maior peso na decisão de um consumidor.

Portanto, o estudo e a aplicação da teoria da confiabilidade vêm crescendo cada vez mais nos setores de planejamento e produção. Atrelado à teoria da confiabilidade a distribuição exponencial é uma das ferramentas de maior uso, pelo fato de tratar de variáveis aleatórias, uma vez que a previsão de falhas de produtos que são sujeitos a variáveis aleatória apresenta maior complexidade do que produtos que são sujeitos a variáveis constantes. Desde modo, o uso da distribuição exponencial permite a previsão de falhas, contribuindo com o planejamento de métodos de prevenção e manutenção dos produtos analisados.

Quanto aos testes efetuados na máquina de solda e a aplicação da teoria nos dados coletados, concluímos que a máquina de solda apresenta uma função de confiabilidade $R(t) = e^{-0,013t}$. Sendo assim podemos afirmar que 89% das chapas não apresentam falhas se o período de solda for de 10 segundos e 77% se o período de solda for de 20 segundos (vide tabela 2). Como o período de solda de cada processo de soldagem se aproxima dos 20 segundos, podemos afirmar que a máquina em questão apresenta uma alta confiabilidade, uma vez que apenas 23% dos processos apresentam falhas.

Pelo fato das peças defeituosas apresentarem porosidade e mordeduras, é possível determinar que as causas das falhas possam ter ocorrido devido à velocidade da soldagem e ao comprimento do arco elétrico, sendo que em alguns processos estes fatores possam ter excedido o ideal. Além do desempenho da máquina de solda, se considerarmos o modelo de teste como sendo acelerado, podemos incluir também alguns fatores que possam ter influenciado nos testes, como: alguma falha no braço robótico; a temperatura ambiente; e erro devido ao tempo de reação do cronometrador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- BALAKRISHNAN, N.; BASU, Asit P. **The Exponential Distribution: Theory, Methods and Applications.** New York: Gordon and Breach, 1995.
- BUSSAB, W. O. & MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 4a Edição, Atual Editora: São Paulo, 1987.
- LARSON, Ron; FARBER, Betsy. **Estatística Aplicada**. 2ª ed. São Paulo: Pearson, 2004.
- LEITE, Andrea P. **Modelagem de Fazendas Eólicas para Estudos de Confiabilidade.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2005.
- MAGALHÃES, Marcos N. e LIMA, Antonio C. P. **Noções de probabilidade e estatística**. São Paulo: Edusp, 2005.
- MATOS, Paulo Z.; ZOTTI, Daianne M. **Análise de Confiabilidade Aplicada à Indústria para Estimações de Falhas e Provisionamento de Custos.** Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.
- MEEKER, William Q; HAMADA, Michael. **Statistical Tools for the Rapid Development & Evaluation of High Reliability Products**. IEEE Transactions on Reliability, v. 44, n.2, p. 187-198, 1995.
- MONTGOMERY**,** Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- OSAKI, Cristiano. **Conceitos de Confiabilidade, Mantenabilidade e Disponibilidade**. (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP. 2001.
- RIGO TEIXEIRA, C. A. **A Confiabilidade como Fator de Valor na Melhoria de Produtos. Estudo de Caso: Sistema de Embreagem Automotiva.** 2004. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, novembro de 2004.
- SANCHES, Ricardo. **Defeitos em Solda Detectáveis Através de Inspeção Visual. Centro Universitário Luterano de Manaus – CEULM. Manaus, 2010.**
- TAVARES DOS SANTOS, **Gilberto. Modelo de Confiabilidade Associando Dados de Garantia e Pós-Garantia a Três Comportamentos de Falhas.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- WERNER, Liane. **Modelagem dos Tempos de Falhas ao Longo do Calendário**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996.