

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

VINICIUS SIQUEIRA MORAES

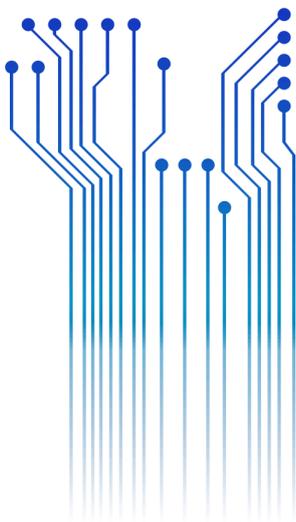


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
CONFIABILIDADE E OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO EM EQUIPAMENTOS:
ESTUDO DE CASO



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
Abril de 2017

VINICIUS SIQUEIRA MORAES

CONFIABILIDADE E OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO EM EQUIPAMENTOS: ESTUDO DE
CASO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
coordenação do curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como
parte dos requisitos necessários para a obtenção
do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Jalberth Fernandes de Araujo, D. Sc.

Campina Grande,
Abril de 2017

VINICIUS SIQUEIRA MORAES

CONFIABILIDADE E OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO EM EQUIPAMENTOS: ESTUDO DE
CASO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
coordenação do curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Jalberth Fernandes de Araújo, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho às pessoas que participaram de forma direta e indireta em toda a minha formação acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda minha família, em especial a minha mãe e meu pai, por terem se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, agradeço também a minha irmã por ter me ajudado tanto durante todo o processo de graduação. Agradeço também a minha namorada Mariana, que com todo carinho e paciência, não mediu esforços para me ajudar em várias ocasiões, sem dúvida a caminhada até o final do processo de graduação se tornou menos árdua ao lado dela. Também agradeço a todos os meus amigos, os que fiz durante o curso Raoni, Rodrigo, Ruan, Suelson, e tantos outros. Além dos amigos de longa data Edvanilson, Alex, André, Douglas, Jairo, Kias, Kel, Robson, Pedro Flávio e tantos outros que sempre estiveram ao meu lado em tantas ocasiões. Sou grato também a orientação do professor Tarso, e ao professor Jalberth por ter assumido o papel de orientador na metade deste trabalho. Também agradeço à Antônio Neto, sem sombra de dúvidas foi quem me motivou na construção do meu conhecimento quanto à confiabilidade. Agradeço ao meu amigo, Lucas Leite, que contribuiu com o banco de dados para concretização deste trabalho. Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“ Às vezes ouço passar o vento;
e só de ouvir o vento passar,
vale a pena ter nascido ”.*
Fernando Pessoa

RESUMO

O presente trabalho é motivado pela problemática de implementação de políticas de otimização da manutenção preventiva e estudos de confiabilidade em equipamentos, presentes no subsistema de acionamento das portas de vagões do sistema metroviário. Todos equipamentos avaliados são sujeitos à manutenção, ou seja, são equipamentos reparáveis, que após falharem, podem ser recuperados e retomados às suas funções primárias. Um plano de manutenção adequado, garante que os equipamentos funcionem com risco de falha controlado, além de promover a redução de custos dispendiosos com políticas inadequadas de manutenção. Portanto será objetivo deste trabalho avaliar a confiabilidade dos equipamentos, bem como identificar qual melhor momento para executar ações de manutenção preventiva em três equipamentos, motor elétrico, pantógrafo e fuso. Ao fim deste trabalho foi possível avaliar, a confiabilidade de todos os objetos de estudo, assim como definir uma política ótima de manutenção e comparar com as sugeridas pelos fabricantes. Além disso, foi possível estabelecer um custo médio para as ações de manutenção preventiva, que configuram uma economia de pelo menos 2,7 vezes em relação a corretiva, ou seja, a diferença entre realizar a manutenção no tempo proposto e simplesmente deixar que o equipamento falhe. Portanto com os valores obtidos, foi possível justificar o emprego da metodologia proposta.

Palavras-chave: Confiabilidade, manutenção preventiva, manutenção corretiva, Minitab, Weibull++, otimização.

ABSTRACT

The present work is motivated by the problem of the implementation of preventive maintenance optimization policies and reliability studies in equipment, there is no subsystem for the activation of the wagon doors of the subway system. All equipment is subject to maintenance, ie repairable equipment which, after failure, can be recovered and resumed from its primary functions. An adequate maintenance plan ensures that the equipment operates at a risk of controlled failure, as well as reducing costly costs with inadequate maintenance policies. Therefore, one objective of this work was a reliability of the equipment, as well as identifying the best time to perform preventive maintenance actions in three equipments, electric motor, pantograph and spindle. The purpose of this work is to evaluate the reliability of all objects of study, as well as to define a maintenance policy and maintenance. In addition, it was possible to establish an average control for the preventive maintenance actions, which constitute an offer of at least 2.7 times in relation to the corrective, or a selection between performing a maintenance without time design and simply letting the equipment, With the values obtained, it was possible to justify the use of the proposed methodology.

Keywords: Reliability, Preventive maintenance, Corrective maintenance, Minitab, Weibull ++, Optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Curva Usual do risco de falha.	22
Figura 2. FDA e FDP da distribuição exponencial.	23
Figura 3. FDA e FDP da distribuição normal.	24
Figura 4. FDA e FDP da distribuição log-normal.	25
Figura 5. FDA e FDP da distribuição log-normal.	26
Figura 6. Linha de regressão.	27
Figura 7. Tipos de Manutenção.	34
Figura 8. Curvas de custo de manutenção preventiva, falha e total.	37
Figura 9. Intervalo de tempo constate para política de substituição.	38
Figura 10. Política de substituição por idade.	39
Figura 11. Teste de aderência para o motor elétrico.	42
Figura 12. Teste de aderência para o fuso.	43
Figura 13. Teste de aderência para o pantógrafo.	43
Figura 14. Visão geral da distribuição para o motor elétrico.	45
Figura 15. Visão geral da distribuição para o fuso.	46
Figura 16. Visão geral da distribuição para o pantógrafo.	46
Figura 17. Tempo ótimo de manutenção para o motor.	48
Figura 18. Tempo ótimo de manutenção para o fuso.	49
Figura 19. Tempo ótimo de manutenção para o pantógrafo.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação e Tipos de Falha.....	17
Tabela 2. Correlação entre as medidas de confiabilidade.....	20
Tabela 3. Medidas de confiabilidade para taxa de falha constante.....	20
Tabela 4. Medidas de confiabilidade para taxa de falha crescente.....	21
Tabela 5. Estimativa dos parâmetros de modelos probabilísticos pelo método dos mínimos quadrados.	28
Tabela 6. Estimativa dos parâmetros de modelos probabilísticos pelo método da máxima verossimilhança.	30
Tabela 7. Intervalos para interpretação do teste do valor-p.....	32
Tabela 8. Intervalos para interpretação do teste do valor-p.....	32
Tabela 9. Equipamentos e Modos de Falha.....	40
Tabela 10. Métodos utilizados no Minitab.....	41
Tabela 11. Resultados dos testes AD e p.....	44
Tabela 12. Parâmetros da distribuição de probabilidade.....	45
Tabela 13. Principais medidas de confiabilidade.....	47
Tabela 14. Custos e tempos ótimos de manutenção preventiva.....	50
Tabela 15. Comparação entre os tempos de manutenção obtidos e fornecidos pelo fabricante.....	50
Tabela 16. Comparação entre os custos de manutenção obtidos com os custos da corretiva.....	51

LISTA DE EQUAÇÕES

(1).....	18
(2).....	19
(3).....	19
(4).....	19
(5).....	19
(6).....	19
(7).....	19
(8).....	22
(9).....	23
(10).....	23
(11).....	24
(12).....	24
(13).....	24
(14).....	25
(15).....	25
(16).....	27
(17).....	27
(18).....	27
(19).....	27
(20).....	27
(21).....	29
(22).....	29
(23).....	31
(24).....	31
(25).....	31
(26).....	37
(27).....	37
(28).....	38
(29).....	38
(30).....	39
(31).....	39
(32).....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARINC	AERONAUTICAL RADIO INC
AD	ANDERSON-DARLING
FDA	FUNÇÃO DENSIDADE ACUMULADA
FDP	FUNÇÃO DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE
H_A	HIPÓTESE ALTERNATIVA
H_0	HIPÓTESE NULA
MCC	MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE
MTBF	TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS
MTTF	TEMPO MÉDIO PARA FALHAR
TTF	TEMPO PARA FALHAR

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
1.1	Objetivo	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
2	Referencial teórico.....	15
2.1	Confiabilidade.....	15
2.1.1	Histórico	15
2.1.2	Conceitos	16
2.1.3	Falhas: Tipos e Classificação.....	17
2.1.4	Medidas de Confiabilidade	18
2.1.5	Modelos de Falha.....	20
2.2	Distribuições de Probabilidade	22
2.2.1	Distribuição Exponencial.....	22
2.2.2	Distribuição Normal	23
2.2.3	Distribuição Log-normal	24
2.2.4	Distribuição Weibull.....	25
2.3	Métodos para estimar Parâmetros	26
2.3.1	Métodos dos Mínimos Quadrados	26
2.3.2	Métodos Máxima Verossimilhança	29
2.4	Teste de Aderência de Anderson Darling (AD) e Teste -p	30
2.5	Dados Censurados.....	32
2.6	Manutenção.....	33
2.6.1	Otimização da manutenção	35
2.6.2	Tempo ótimo de substituição	35
2.6.3	Modelagem Matemática	36
3	Metodologia.....	40
4	Estudo de Caso E Análise de Resultados	42
5	Conclusão	52
	Referências	54
	ANEXO I.....	56

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução dos processos produtivos e com a ascensão dos modelos de economia globalizada, houve um grande aumento da produção de produtos e sistemas, os quais necessitam cada vez mais possuir desempenho adequado a custos competitivos. Para tanto há necessidade da redução da probabilidade de falhas e melhorias nos procedimentos de manutenção. Portanto cria-se precedentes para aplicação do estudo de confiabilidade e otimização das políticas de manutenção (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).

Confiabilidade é a probabilidade de um componente cumprir suas funções de forma adequada, dentro de um período de tempo pré-determinado (CAMARGO, 1981). Do ponto de vista de gestão, a engenharia da confiabilidade e otimização da manutenção tornam-se fortes aliados, fornecendo meios para especificar, projetar, testar e demonstrar a performance de vida de equipamentos, produtos, sistemas e linhas de processos, influenciando diretamente nas finanças de uma empresa (SPANÓ, 2016).

Um caso de sucesso, e, portanto, motivador é descrito na página do *software* Minitab®¹, ferramenta na qual será utilizada na condução da maior parte das análises deste trabalho. O desafio consistia em reunir dados de equipamentos médicos e definir uma política de manutenção que reduzisse a inatividade dos equipamentos. Pois segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), 50% dos equipamentos, em países desenvolvidos, não funcionam ou não passam por manutenção apropriada devido à falta de uma política de gerenciamento eficaz.

A equipe então analisou a inatividade dos equipamentos e definiu os principais modos de falha de cada um, em que a maior causa da inatividade foi causada por problemas elétricos. Portanto foi definida uma nova política de manutenção, a qual foi implantada em uma instalação. Na instalação houve aumento da confiabilidade dos equipamentos e conseqüentemente a redução o tempo de inatividade em 35%, sem incorrer em nenhum gasto adicional. Fato no qual caracteriza, além de retorno econômico,

¹ O *software* encontra-se disponível no site: <https://www.minitab.com>

a possibilidade maior disponibilidade dos equipamentos médicos, e portanto, melhorando a qualidade na assistência de saúde.

Existem diversas ferramentas que auxiliam nos estudos de confiabilidade, dentre elas destaca-se o Minitab®, software no qual foi criado em 1972 por três professores da *University Penn State* Pensilvânia com a finalidade de facilitar o ensino de estatística a estudantes, constituindo a partir de então, uma poderosa ferramenta para análises estatísticas, fornecendo meios eficazes para análises de dados. Hoje, além da aplicação na área acadêmica, é largamente utilizado por empresas de vários setores, como por exemplo automotivo, saúde e fabril, objetivando identificar falhas em seus processos e assim melhorá-los. (MINITAB INC, 2016)

Portanto, neste trabalho será realizado um estudo de caso, a partir de uma base de dados real, em que serão utilizadas as principais ferramentas do Minitab® para estudos de confiabilidade, além disso será utilizado o *software* Weibull ++ para realizar a análise quanto à otimização da manutenção preventiva.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é empregar técnicas de otimização para melhorar a manutenção preventiva e a confiabilidade de equipamentos presentes em vagões de metrô.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral do trabalho devem ser realizados os seguintes objetivos específicos:

- i. Realizar testes de aderência para validação do modelo probabilístico;
- ii. Aplicar métodos numéricos para cálculos de parâmetros;
- iii. Realizar a construção gráfica e identificar as principais medidas de confiabilidade;
- iv. Implementar planos de manutenção visando estimar o tempo ótimo para realização de manutenção preventiva.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONFIABILIDADE

2.1.1 HISTÓRICO

A contextualização histórica do presente trabalho é baseada no estudo *Four Decades of Reliability Progress*, publicado em 1991, o qual possuía o objetivo de examinar a confiabilidade de uma forma semi-quantitativa, de modo a criar uma base histórica e inferir a partir deste exame, possíveis lições para o futuro. Para tanto o autor define em uma linha histórica a evolução dos métodos empregados nos estudos de confiabilidade, bem como os principais eventos que marcaram ao longo do tempo a construção do conhecimento a respeito do tema.

O conceito de confiabilidade, do ponto de vista quantitativo, surge no contexto pós segunda guerra mundial nos anos 50, em que os estudos iniciais foram concentrados em equipamentos eletrônicos, mais especificamente em tubos eletrônicos. Estudos nos quais foram conduzidos por *Aeronautical Radio, Inc (ARINC)*, *Vitro Corporation* e *Bell Telephone Laboratories*, marcando o início do processo científico de observação e medição, e como consequência ocorreram melhorias na confiabilidade dos tubos. Ademais, houve também nessa época o início das metodologias de generalização e teste, mais especificamente, o início das aplicações de inferência estatística para formulação de hipóteses (KNIGHT, 1991).

Nos anos 60, devido a guerra fria, houve grande interesse no desenvolvimento tecnológico de mísseis internacionais e na pesquisa aeroespacial, com isso motivou-se avanços na área de confiabilidade, uma vez que as duas atividades envolviam riscos humanos. Destaca-se o fato de que em 1963 surgiu, nos EUA, a primeira associação de engenheiros de confiabilidade e o primeiro periódico para divulgação de trabalhos na área, o IEEE – *Transactions on Reliability* (KNIGHT, 1991).

Nos anos 70, estudos de confiabilidade tornaram-se presentes em análises de riscos associados à construção e operação de usinas nucleares, a partir desse momento há uma consolidação das diversas áreas de estudos, as quais destacam-se: análises de risco e

segurança, qualidade, otimização da manutenção, proteção ambiental e projeto de produtos (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).

A partir dos anos 80, com intensificação dos processos de automação, que acarretaram em maior complexidade dos processos produtivos e com normas mais e rigorosas quanto à qualidade dos produtos, surgiu a implementação de técnicas de manutenção centrada na confiabilidade (MCC), a qual possui como objetivo geral estabelecer mecanismos de manutenção baseados no estudo de confiabilidade de qualquer item físico em seu contexto operacional. A (MCC) é uma das metodologias mais difundidas e empregada na indústria até os dias atuais, junto com técnicas de manutenção preditiva (NASCIF, 2000).

2.1.2 CONCEITOS

A definição de confiabilidade, pode abranger um sistema, equipamento ou item (partes ou peças de um equipamento). No âmbito de sistemas, há uma ressalva, em que para realização dos estudos há necessidade do emprego de outras técnicas de análise, como por exemplo as de confiabilidade estrutural, técnicas nas quais exigem maior grau de abstração, tornando a análise mais complexa, portanto não será foco do presente trabalho.

Os conceitos de qualidade e confiabilidade são comumente confundidos, sendo que o último é um parâmetro do primeiro. Qualidade pode ser entendida como um cumprimento de especificações de projeto. Segundo (GARVIN, 2009), a qualidade de um produto pode avaliada como a adequação dos seguintes indicadores: desempenho, confiabilidade, durabilidade, estética, qualidade observada, conformidade com o padrão e características adicionais. Outros conceitos relevantes a respeito da confiabilidade são:

- **Disponibilidade:** O conceito de disponibilidade varia de acordo com a reparabilidade do sistema. Para um sistema reparável, o conceito de disponibilidade é definida como a capacidade de um determinado item, quando submetido a manutenção adequada, desempenha sua função em um intervalo de tempo definido, sempre que solicitado. Em um sistema não reparável, o conceito de disponibilidade é equivalente ao de confiabilidade por (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).

- **Mantenabilidade:** É a capacidade que determinado item possui de se manter desempenhando suas funções pré-estabelecidas após ser submetido à manutenção (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).
- **Segurança:** É definida como o nível aceitável de risco, sob condições de operação as quais possam garantir que pessoas, equipamentos ou imóvel estejam submetidos ao mínimo dano possível (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).
- **Confiança:** É utilizada para definir o coletivo que inclui disponibilidade e seus fatores determinantes, o desempenho da confiabilidade, da manutenibilidade e do suporte técnico, ou seja, é uma medida qualitativa semelhante à confiabilidade, porém não caracterizada estritamente pela definição probabilística (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).

2.1.3 FALHAS: TIPOS E CLASSIFICAÇÃO

Entende-se como falha, o estado de um item, equipamento ou sistema que não desempenhem sua função fundamental de forma adequada, ou seja, é a perda parcial ou total de sua capacidade de funcionamento. As falhas podem ser classificadas segundo sua natureza, conforme pode ser visto na Tabela 1 (CAMARGO, 1981).

Tabela 1. Classificação e Tipos de Falha.

Classificação	Tipo de falha
Segundo o grau de influência na capacidade de trabalho	Total/ Parcial
Segundo o caráter físico do aparecimento da falha.	Catastrófica/Paramétrica
Segundo outras falhas	Dependente /Independente
Segundo o processo de aparecimento da falha	Repentina/Gradual
Segundo o tempo de existência da falha	Permanente/Temporária/intermitente

Fonte: (CAMARGO, 1981).

Quando se trata de falha além de sua característica fenomenológica, é importante distinguir três medidas comumente empregadas em estudos de confiabilidade. A primeira é definida como tempo até falhar TTF (do inglês *time to fail*). Segundo (FOGLIATO e

RIBEIRO, 2009) tempo até falhar, é o tempo decorrido, integrando o início da operação de uma unidade, até a ocorrência de sua primeira falha. É importante destacar que nem sempre TTF será mensurado por meio de valores contínuos de tempo, ou seja, o modo no qual o equipamento opera, definirá como ele será avaliado na implementação de um estudo de confiabilidade. Por exemplo, no caso de disjuntores, a condução de um estudo será mais coesa, se a quantidade de acionamentos for tomada como parâmetro, ao invés do tempo de funcionamento até a falha.

A segunda medida é tempo médio entre falhas MTBF (do inglês *mean time between failure*). Segundo (CAMARGO, 1981) tempo médio entre falhas é o tempo médio de funcionamento de um dispositivo, intercalado por duas falhas, que mensura o tempo médio no qual um equipamento fica disponível, portanto quanto maior for o MTBF, maior será a confiabilidade do equipamento.

A terceira medida é o tempo médio para falha MTTF (do inglês *mean time to failure*), que é o valor médio esperado para ocorrência de falha no equipamento, e segundo (CAMARGO, 1981) MTTF é o valor médio dos tempos de funcionamento, caracterizado pela soma entre o tempo médio para falha e o tempo médio de reparo do equipamento.

2.1.4 MEDIDAS DE CONFIABILIDADE

Definidos os conceitos básicos sobre confiabilidade, há a necessidade da caracterização matemática das principais medidas de confiabilidade, as quais demonstram o comportamento probabilístico do objeto de estudo. Para tanto, considera-se T uma variável aleatória distribuída continuamente e com densidade de probabilidade (FDP) dada por $f(t)$. Logo, a função distribuição acumulada (FDA) de T é dada pela equação (1):

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u) du, t > 0, \quad (1)$$

em que $F(t)$ define a probabilidade de falha de uma unidade em um intervalo de tempo menor ou igual a t .

Fazendo uso ainda da variável aleatória T , a função de confiabilidade $R(t)$ em um tempo t é expressa pela equação (2):

$$R(t) = P(T > t) = 1 - \int_0^t f(u) du, t > 0, \quad (2)$$

em que $R(t)$, define a probabilidade de uma unidade apresentar sucesso durante sua operação no intervalo menor ou igual a t . (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).

Uma das medidas de confiabilidade mais difundida na prática é a função de risco $h(t)$, a qual define-se como a quantidade de risco associada a um equipamento no tempo t , normalmente dada em termos de falhas por unidade de tempo e definida segundo (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009) pelo desenvolvimento das equações (3) a (6), considerando a probabilidade de falha entre t e $t + \Delta t$:

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} f(u) du = R(t) - R(t + \Delta t), \quad (3)$$

empregando a probabilidade condicional e considerando que o evento está condicionado no tempo t :

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t | T \geq t) = \frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t)}{P(T \geq t)}, \quad (4)$$

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t | T \geq t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)}, \quad (5)$$

no intervalo considerado, uma taxa média de falha pode ser calculada pela divisão da equação (5) por Δt e fazendo-o tender a zero tem-se a expressão (6).

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)}, t \geq 0, \quad (6)$$

Correlações entre as medidas de confiabilidade observadas encontram-se detalhadas na Tabela 2.

Tabela 2. Correlação entre as medidas de confiabilidade.

	$f(t)$	$R(t)$	$h(t)$
$f(t)$	-	$\int_t^{\infty} f(u) du$	$f(t) / \int_t^{\infty} f(u) du$
$R(t)$	$-R'(t)$	-	$-R'(t) / R(t)$
$h(t)$	$h(t)e^{-\int_0^t h(u) du}$	$e^{-\int_0^t h(u) du}$	-

Fonte: adaptado do livro (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009).

2.1.5 MODELOS DE FALHA

Dentre os modelos matemáticos para estimar a função de risco $h(t)$, destacam-se três, os quais são estabelecidos segundo a natureza da ocorrência das falhas e em casos em que se possa aproximar a função de falha por uma reta.

O primeiro modelo a ser estabelecido considera que a taxa de falha (λ) é constante, a qual implica numa função densidade exponencial negativa e uma função de confiabilidade exponencial conforme pode ser observado na Tabela 3. O que pode ser extraído como comportamento do equipamento, o qual possui essa representação matemática, é que o tempo de vida restante não é dependente da quantidade de tempo que o equipamento tenha funcionado (CAMARGO, 1981).

Tabela 3. Medidas de confiabilidade para taxa de falha constante.

$h(t)$	$f(t)$	$R(t)$	$F(t)$
λ	$\lambda e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	$1 - e^{-\lambda t}$

Fonte: (CAMARGO, 1981), adaptado.

No segundo modelo é considerado que a taxa de falha (λ) é linearmente crescente. Logo, indica o envelhecimento da unidade, comumente por meio da ação de agentes químicos e físicos que provocam a degradação da qualidade. Assim como na Tabela 3, na Tabela 4 são detalhadas as medidas de confiabilidade para esse modelo (CAMARGO, 1981).

Tabela 4. Medidas de confiabilidade para taxa de falha crescente.

$h(t)$	$f(t)$	$R(t)$	$F(t)$
Kt	$Kte^{-\left(\frac{Kt^2}{2}\right)}$	$e^{-\left(\frac{Kt^2}{2}\right)}$	$1 - e^{-\left(\frac{Kt^2}{2}\right)}$

Fonte: (CAMARGO, 1981), adaptado.

O terceiro modelo considera a taxa de falha linearmente decrescente, em que as falhas tendem a diminuir ao longo do tempo. Esse modelo é dependente de dois parâmetros K_0 e K_1 , sendo que adicionou-se uma rampa após $t \geq t_0$ e $h(t)$ é definido em três intervalos distintos, conforme observado na Tabela 5.

Tabela 5. Medidas de confiabilidade para taxa de falha decrescente.

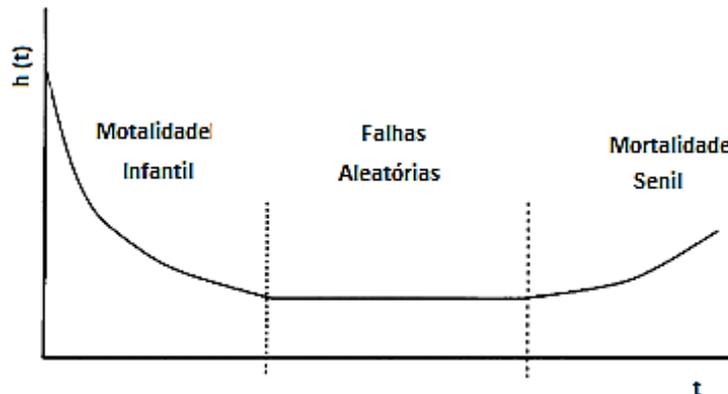
<i>Intervalo</i>	$h(t)$	$f(t)$	$R(t)$	$F(t)$
$0 < t \leq K_0/K_1$	$k_0 - k_1t$	$k_0 - k_1te^{-\int_0^t k_0 - k_1t dt}$	$e^{-\int_0^t k_0 - k_1t dt}$	$1 - e^{-\int_0^t k_0 - k_1t dt}$
$K_0/K_1 < t \leq t_0$	0	0	1	0
$t_0 < t \leq +\infty$	$K(t - t_0)$	$K(t - t_0)e^{-\int_0^t k(t-t_0)dt}$	$e^{-\int_0^t k(t-t_0) dt}$	$1 - e^{-\int_0^t k(t-t_0) dt}$

Fonte: (CAMARGO, 1981), adaptado.

Os modelos de taxa de falha descritos acima podem ser sintetizados em um modelo conceitual, conforme pode ser visto na Figura 1. O primeiro intervalo, mostrado no gráfico, representa a mortalidade infantil, proveniente de defeitos relacionados à

qualidade, ou seja, má adequação do projeto ou deficiências de fabricação. O segundo intervalo representa a maior parte da vida útil de um produto, em que a taxa de falha é constante e falhas ocorrem devido ao acaso. O terceiro intervalo representa as falhas tardias, onde falhas ocorrem mediante ao desgaste (MEEKER e ESCOBAR, 1998).

Figura 1. Curva Usual do risco de falha.



Fonte: (MEEKER e ESCOBAR, 1998)

2.2 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

Nesta seção serão abordadas as distribuições de probabilidade contínuas mais comuns em estudos de confiabilidade, as quais destacam-se a distribuição exponencial, normal, log-normal e weibull. Cabe destacar que as distribuições que serão discutidas, não são as únicas utilizadas em análises de confiabilidade, muito embora sejam a grande maioria, outras distribuições, são mais adequadas mediante a fenômenos específicos, como por exemplo as distribuições gama, logística e student.

2.2.1 DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL

Segundo (PORTAL ACTION, 2017) a distribuição exponencial caracteriza-se por ter uma taxa de falha (λ) constante, taxa na qual modela a FDP denominada por parâmetro de forma da distribuição. Dentre as distribuições de probabilidade, a distribuição exponencial é a mais simples em termos matemáticos, sua função de densidade de probabilidade expressa pela seguinte equação:

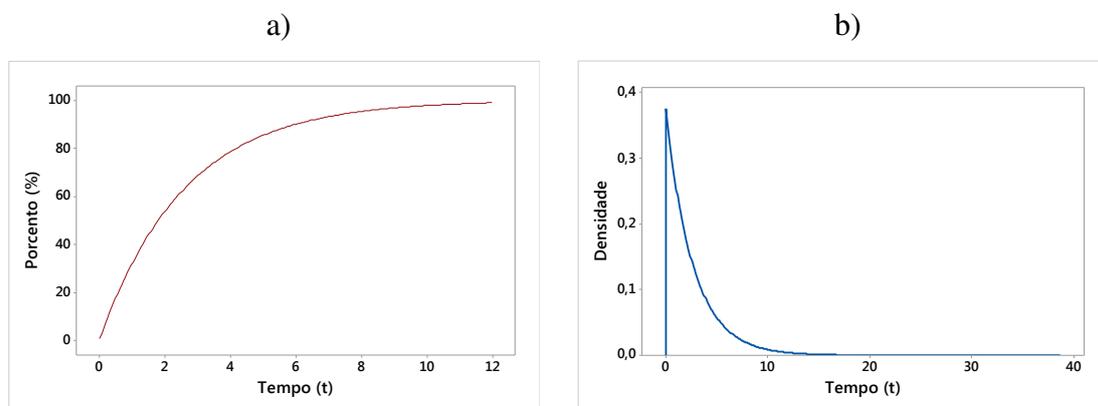
$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t}, & \text{se } t \geq 0 \\ 0, & \text{se } t < 0 \end{cases} \quad (7)$$

em que λ , deve ser maior que zero e para esta distribuição, λ é igual ao tempo médio de vida. A (FDA) é expressa pela equação (8) a seguir:

$$F(t) = \int_0^t f(u)du \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t}, & \text{se } t \geq 0 \\ 0, & \text{se } t < 0 \end{cases}, \quad (8)$$

Os gráficos³ de $f(t)$ e $F(t)$ podem ser vistos conforme a Figura 2 a) e b) em que para plotá-los, foi considerado um conjunto aleatório de dados, o qual possui o valor de parâmetro de forma $\lambda = 2,667$.

Figura 2. a) FDA, b) FDP da distribuição exponencial.



Fonte: autoria própria .

2.2.2 DISTRIBUIÇÃO NORMAL

A distribuição normal, também conhecida como gaussiana, é uma das distribuições de probabilidade contínua mais importantes. Ela é empregada, por exemplo, em estudos de análises de características populacionais (PORTAL ACTION, 2017). A sua (FDP) é expressa pela equação (9) a seguir:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}, t \in (-\infty, \infty), \quad (9)$$

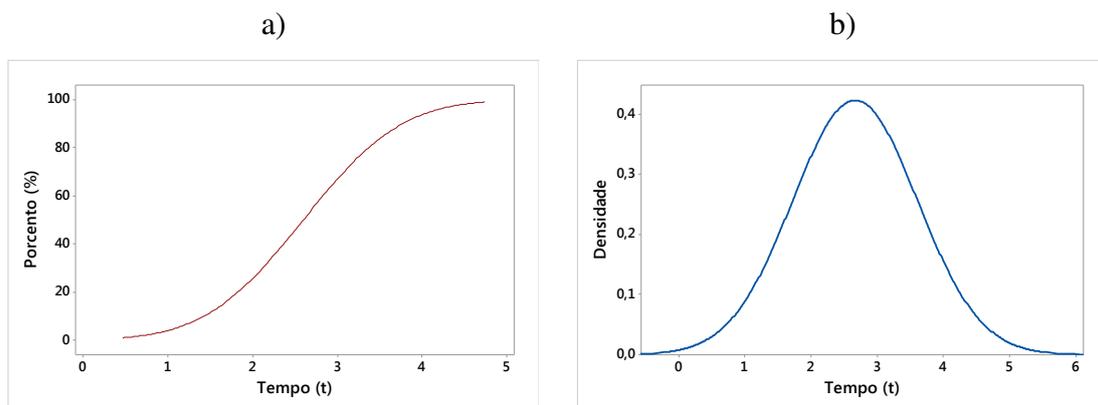
em que σ é igual ao desvio padrão, denominado por parâmetro de escala e μ é igual a média, denominada por parâmetro de localização. A FDA é estabelecida em conformidade com a equação (10)

³ Todos os gráficos da seção distribuições de probabilidade foram traçados com auxílio do *software* Minitab®

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]} dt, \quad (10)$$

Os gráficos de $f(t)$ e $F(t)$ podem ser vistos na Figura 3 a) e b) , em que foi considerado o mesmo conjunto aleatório de dados utilizados para a distribuição anterior, o qual possui os seguintes valores de desvio padrão e média respectivamente $\sigma = 0,942$ e $\mu = 2,667$.

Figura 3. FDA e FDP da distribuição normal.



Fonte: autoria própria.

2.2.3 DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL

A distribuição log-normal é uma das distribuições mais adequadas ao caracterizar o tempo de vida de produtos e materiais, como por exemplo fadiga de metal, diodos semicondutores e isolamento elétrica (PORTAL ACTION, 2017). A (FDA) é definida pela equação (11) abaixo:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[\frac{-(\log(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]}, \quad (11)$$

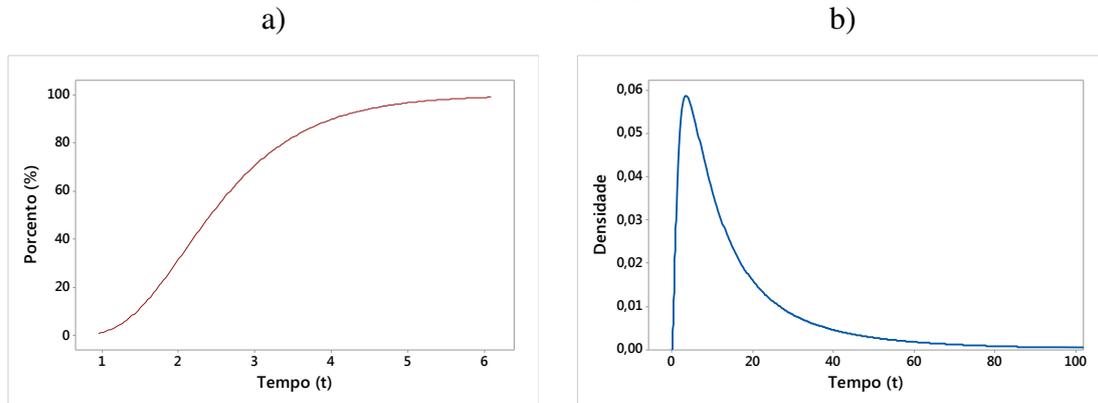
em que μ é igual a média do logaritmo do tempo de falha, denominado por parâmetro de escala e σ é igual ao desvio padrão, denominado por parâmetro de localização. A (FDA) é expressa de acordo com a equação (12):

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[\frac{-(\log(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} dt, \quad (12)$$

Os gráficos de $f(t)$ e $F(t)$ podem ser vistos na Figura 4 a) e b) , em que foi considerado o mesmo conjunto aleatório de dados anterior, o qual possui os seguintes valores de desvio padrão e média respectivamente $\sigma = 1,079$ e $\mu = 2,667$.

Figura 4. FDA e FDP da distribuição log-normal.

Fonte: autoria própria.



2.2.4 DISTRIBUIÇÃO WEIBULL

Esta distribuição de probabilidade é sem dúvida a mais utilizada para descrever o tempo de vida de produtos industriais, devido ao fato de que ela apresenta uma grande variedade de formas, todas elas com a propriedade de suas funções de taxa de falha serem monótonas, ou seja ou é crescente ou decrescente ou constante (PORTAL ACTION, 2017). A sua (FDP) é expressa de acordo com a equação 13 a seguir:

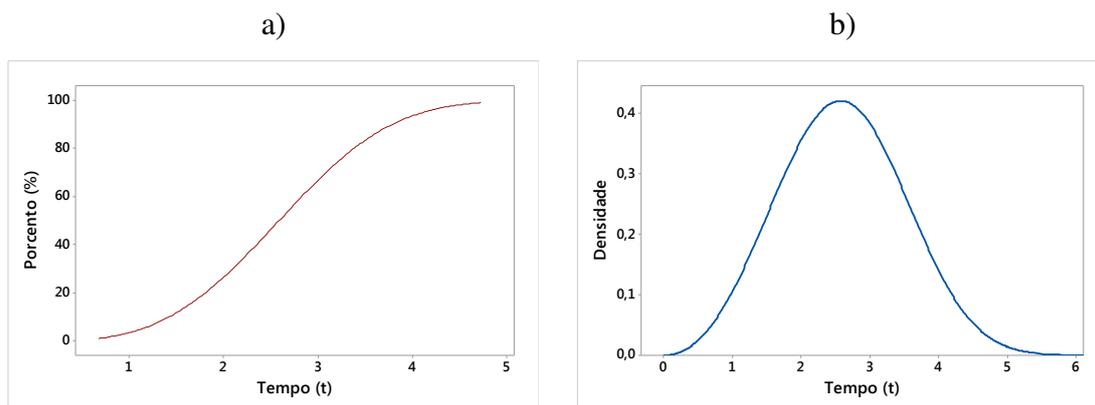
$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} t^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha}, \quad (13)$$

em que α é o parâmetro de forma e β é o parâmetro de escala. A (FDA) é expressa de acordo com a equação (14):

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} \quad (14)$$

Os gráficos de $f(t)$ e $F(t)$ podem ser visto na Figura 5 a) e b) , em que foi considerado o mesmo conjunto aleatório de dados anterior, o qual possui os seguintes valores de parâmetros de forma e escala, respectivamente $\alpha = 3,149$ e $\beta = 2,911$.

Figura 5. FDA e FDP da distribuição log-normal.



Fonte: autoria própria.

2.3 MÉTODOS PARA ESTIMAR PARÂMETROS

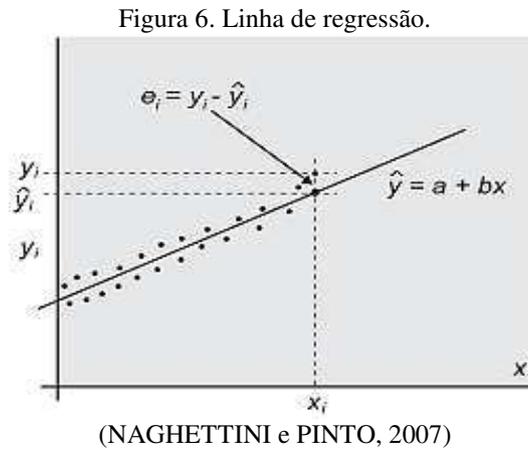
A inferência estatística é o procedimento no qual é possível extrair informações de uma população por meio de amostras. As técnicas estatísticas de inferência são divididas em duas áreas, estimação de parâmetros e testes de hipótese (HINES, MONTGOMERY, *et al.*, 2003). No presente trabalho será definido apenas o primeiro método, pois ele dará suporte no cálculo de parâmetros das distribuições de probabilidade, e assim obter uma representação matemática da população de determinado equipamento por meio dos parâmetros obtidos nas amostras.

Em termos gerais, as metodologias para estimar os parâmetros traduzem a realidade física de uma amostra de dados para a concepção de um modelo matemático abstrato descrito por uma variável aleatória (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Dentre os métodos de para estimar os parâmetros, será foco deste trabalho o emprego do método da máxima verossimilhança e mínimos quadrados, que são os métodos empregados no *software* Minitab®, os quais serão explicitados as seguir.

2.3.1 MÉTODOS DOS MÍNIMOS QUADRADOS

O objetivo do método dos mínimos quadrados é otimizar o ajuste para um conjunto de dados. Para tal deve-se encontrar a equação de regressão que minimize a soma das distâncias entre a função ajustada e os pontos observados (NAGHETTINI e PINTO, 2007). De fato, pode-se observar com auxílio da Figura 6 a reta de ajuste a ser e

definida, formalizada pela equação (15), assim como a distância entre o valor estimado e observado dada pela equação (1).



$$\hat{y}_i = a + bx_i, \quad (15)$$

$$e_i = y_i - \hat{y}_i, \quad (16)$$

substituindo 15 em 16, tem-se:

$$e_i = y_i - a - bx_i, \quad (17)$$

Na estimativa dos parâmetros de uma distribuição de probabilidade, o método dos mínimos quadrados é relativamente fácil implementar, uma vez que em sua maioria as distribuições podem ser linearizadas. Considerando linearizada a distribuição de probabilidade, a aplicação do método dos mínimos quadrados, será consolidada pelo somatório dos quadrados dos desvios, entre o valor observado y_i e o valor estimado \hat{y}_i conforme a equação 18 a seguir:

$$e_i^2 = (y_i - a - bx_i)^2 = y_i^2 - 2y_i a - 2y_i b x_i + a^2 + 2abx_i + b^2 x_i^2, \quad (18)$$

para n elementos da amostras,

$$Z = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - 2a \sum_{i=1}^n y_i - 2b \sum_{i=1}^n y_i x_i + na^2 + 2ab \sum_{i=1}^n x_i + b^2 \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (19)$$

sendo $Z = f(a, b)$, os valores de a e b que minimizam a equação 19 são obtidos calculando as derivadas parciais de Z e igualando a zero. Por fim a solução do sistema permite estimar os parâmetros do modelo de regressão linear. Na Tabela 5, encontra-se o um resumo para o cálculo dos parâmetros das distribuições de probabilidade usadas no presente trabalho.

Tabela 5. Estimativa dos parâmetros de modelos probabilísticos pelo método dos mínimos quadrados.

Modelo Probabilístico	Parâmetro	Parâmetro estimado (θ)
Exponencial	λ	$\frac{\frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n} - \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}}$
	γ	$\frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)}$
Weibull	θ	$e^{(\bar{x} - \frac{\bar{y}}{\gamma})}$
	σ	$\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n}}$
Normal	μ	$\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - \frac{\sigma \sum_{i=1}^n y_i}{n}$
	σ'	$\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n}}$
Log-normal	μ'^4	$\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - \frac{\sigma \sum_{i=1}^n y_i}{n}$

Fonte: (NETO e MORAES, 2017).

⁴ σ' e μ' são a raiz quadrada da variância dos logaritmos naturais dos pontos de dados o parâmetro representa a média dos logaritmos naturais dos tempos de falha respectivamente

MÉTODOS MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA

O método da máxima verossimilhança é um dos mais difundidos para estimar os parâmetros das distribuições de probabilidade. Sua aplicação consiste em maximizar uma função dos parâmetros, conhecida como função de verossimilhança, conforme visto na equação (20) (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Considerando y_1, y_2, \dots, y_N , amostras aleatórias retiradas de uma população, com a (FDP) dada por $f(y_i, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$, tem-se:

$$L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) = \prod_{i=1}^N f(y_i, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad (20)$$

em que L é a função de verossimilhança associada à amostra e θ_k , são os k parâmetros das distribuições as quais se deseja obter via máxima verossimilhança. A condição de máximo para a equação (20), resulta em um sistema com k equações e k incógnitas, descrito em conformidade com a equação (21).

$$\frac{\partial(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)}{\partial \theta_j} = 0; j = 1, 2 \dots, k. \quad (21)$$

As soluções para o sistema de equações, representado pela equação (21), são denominados por estimadores de máxima verossimilhança. Além disso, é frequente o emprego da função logaritmo de verossimilhança, a qual consiste em aplicar o logaritmo na equação (20). Portanto facilita a construção do sistema expresso pela equação (21), devido ao fato que a função logaritmo ser contínua, monótona e crescente, logo a maximização da função log é o mesmo que maximizar a função. Na Tabela 6, encontra-se um resumo para o cálculo dos parâmetros das distribuições de probabilidade usadas no presente trabalho.

Tabela 6. Estimativa dos parâmetros de modelos probabilísticos pelo método da máxima verossimilhança.

Modelo Probabilístico	Parâmetro	Parâmetro estimado (θ)
Exponencial	λ	\bar{x}
Weibull	$\beta^{-\alpha}$	$\frac{N}{\sum_{i=1}^N x_i^\alpha}$
	α	$\frac{N}{\beta^{-\alpha} \sum_{i=1}^N x_i^\alpha \ln(x_i) - \sum_{i=1}^N \ln(x_i)}$
Normal	σ	$\sqrt{\pi l_2}$
	μ	l_1
Log-normal	σ	s_y
	μ	\bar{y}

Fonte: (HINES, MONTGOMERY, *et al.*, 2003).

2.4 TESTE DE ADERÊNCIA DE ANDERSON DARLING (AD) E

TESTE -P

O teste de Anderson-Darling é empregado na verificação da aderência de uma amostra de dados de uma população, mais especificamente adequação ao modelo probabilístico, face à determinada distribuição de probabilidade (NIST/SEMATECH, 2003), ou seja, para cada amostra de dados realizada, haverá uma tendência de adequação

ao modelo de distribuição de probabilidade, estabelecida pelo valor do coeficiente de (AD).

A partir da visão de (NAGHETTINI e PINTO, 2007), estabelece que o teste de aderência de (AD) é um teste não paramétrico, o qual procura ponderar mais fortemente as caudas das distribuições, fato no qual não ocorre em outros testes tais quais Qui-Quadrado e Kolmogov-Smirnov, que pode acarretar na qualidade do ajuste.

O teste de (AD) é definido segundo a caracterização de duas hipóteses. A primeira denominada por hipótese nula (H_0), a qual estabelece que a amostra de dados segue uma distribuição de probabilidade específica. A segunda hipótese, denominada por hipótese alternativa (H_a), estabelece que a amostra de dados não segue a distribuição de probabilidade específica. A formulação do teste (AD), baseia-se em estabelecer a diferença entre as (FDAs), empírica e teórica de variáveis aleatórias contínuas (NAGHETTINI e PINTO, 2007). O teste estatístico de (AD) é definido segundo a equação (22) a seguir:

$$A^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{[F_N(t) - F_x(t)]^2}{F_x(t)[1 - F_x(t)]} f(t) dt \quad (22)$$

em que, A é o valor do coeficiente (AD), $F_x(t)$ é a (FDA) empírica, $F_N(t)$ é a (FDA) teórica e $f(t)$ a (FDP), segundo a hipótese nula. A equação (22) pode ser calculada da seguinte forma:

$$A^2 = -N - S \quad (23)$$

onde:

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{(2i - 1) \{ \ln F_x(x_i) + \ln [1 - F_x(x_{(N-i+1)})] \}}{N} \quad (24)$$

em que $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ representam as amostras coletadas em modo crescente.

Se $A^2 > A_{crit}^2$ a hipótese nula é rejeitada, onde A_{crit}^2 é o valor crítico para o teste (AD), o qual possui seus valores tabelados para cada distribuição de probabilidade, conforme pode ser visto na Tabela 7. Por fim, segundo (NAGHETTINI e PINTO, 2007) deve ser feita uma especificação prévia de um nível de significância α , o qual cumpre o papel de remover o grau de subjetividade associado à tomada de decisão. Cabe a quem

for realizar o estudo, definir o nível de significância no qual se deseja obter trabalhar, considerando que, quanto maior for o nível escolhido, mais preciso será o resultado.

Tabela 7. Intervalos para interpretação do teste do valor-p.

		α	0,1	0,05	0,025	0,01
Exponencial		A_{crit}^2	0,980	1,219	1,460	1,779
Normal	e					
Log	–	A_{crit}^2	0,631	0,752	0,873	1,035
Normal						
Weibull		A_{crit}^2	0,637	0,757	0,877	1,038

Fonte: (AGOSTINO, 1986)

O teste p, assim como o teste de aderência de AD, fazem parte da gama de ferramentas para validação ou rejeição de hipóteses, dependendo diretamente de uma dada amostra. Ele fornece uma medida do grau de aderência dos resultados de um teste. Caso a hipótese nula for verdadeira, então o valor-p é uma medida quantitativa para alimentar o processo de tomada de decisão como evidência. Conforme observado na Tabela 8, pode ser vista uma interpretação razoável do valor-p (CLAYTON STATE UNIVERSITY, 2012).

Tabela 8. Intervalos para interpretação do teste do valor-p.

Valor p	Interpretação
$P < 0,01$	Evidência muito forte contra H_0
$0,01 \leq P < 0,05$	Evidência moderada contra H_0
$0,05 \leq P < 0,10$	Evidência sugestiva contra H_0
$P \leq 0,001$	Pouca ou nenhuma evidência contra H_0

Fonte: (CLAYTON STATE UNIVERSITY, 2012)

2.5 DADOS CENSURADOS

Segundo (MEEKER e ESCOBAR, 1998) “A censura restringe a capacidade de observar exatamente os tempos de falha, é comum na análise dos dados de confiabilidade e surgem por uma série de razões diferentes”. Na visão de (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009) experimentos podem ser ditos como completos, ou seja, quando na execução de um experimento com n equipamentos idênticos é possível observar todos os tempos de

falha das n unidades. Por outro lado, uma série de fatores acarretam na inviabilidade de se obter dados completos, dentre os quais se destacam: (i) critérios de ordem prática ou econômica (ii) algumas equipamentos perdem-se ou danificam-se durante o teste (iii) não foi possível registrar o momento exato no qual a unidade falha.

Ainda pela ideia de (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009) sugerem que mesmo com uma base de dados parciais a respeito do experimento, é possível obter conclusões seguras sobre a distribuição que caracteriza os TTFs do equipamento. Essa base de dados de TTF é dita como censurada ou truncada e é classificada como: à esquerda, por intervalo e à direita, sendo esta última classificada como: tipo I e tipo II.

Segundo (FOGLIATO e RIBEIRO, 2009) “Dados censurados à direita, são aqueles nos quais para uma ou mais unidades se conhece apenas o limite inferior do tempo até a falha”. Ou seja, após o término de um determinado experimento, uma ou mais unidades venham a sobreviver além do tempo amostrado, os tempos para as unidades restantes são classificados como tempo exato até a falha, esse tipo de censura por tempo é classificada como Tipo I. Por outro lado se ao invés do tempo como condição de término do experimento for empregado o número de falhas que devem ocorrer, a censura é dita como tipo II.

A censura por intervalo ocorre quando não é conhecido exatamente o tempo até a falha da unidade em questão, se conhece apenas o intervalo de tempo que ela é submetida. Corriqueiramente ocorrendo em empresas que adotam inspeções periódicas dos equipamentos.

2.6 MANUTENÇÃO

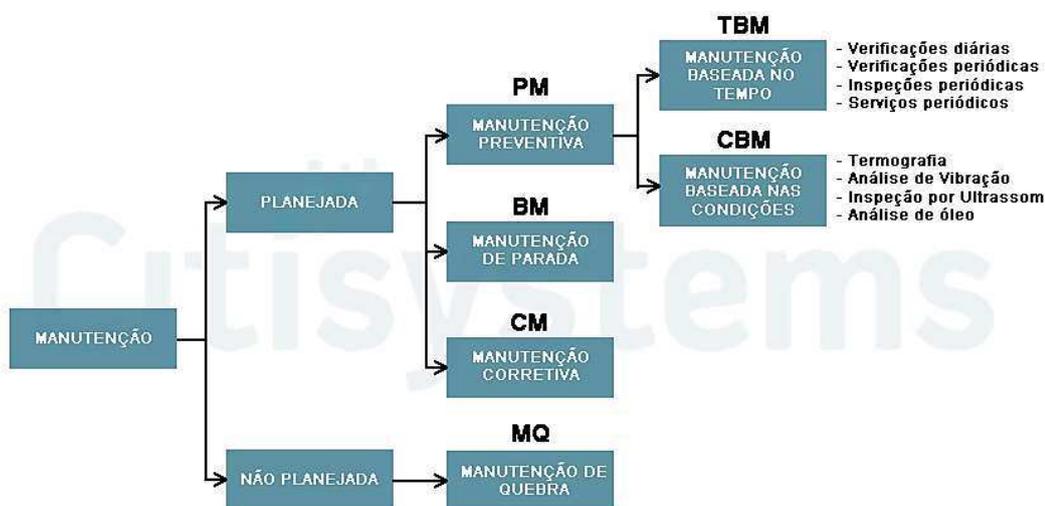
De acordo com (IEC, 2015) “Manutenção é a combinação de todas as técnicas e gestão, destinadas a reter um item ou restaurá-lo em um estado no qual ele possa executar conforme necessário”, ou seja, é o conjunto de ações que asseguram a permanência de operação de um determinado equipamento, garantindo que este desempenhe seu papel na cadeia produtiva.

Dentre as diversas metodologias empregadas em planos de manutenção é comum a essas que os sistemas ou itens submetidos ao plano sejam reparáveis, ou seja, mediante a um defeito é possível que os sistemas possam ser reparados e voltarem a desempenhar seu devido papel sem comprometer a qualidade e/ou rendimento do processo no qual

estão inseridos. Para sistemas ou itens ditos reparáveis, o processo de manutenção é fundamental para garantir seu pleno funcionamento, afetando diretamente a confiabilidade, a disponibilidade, o tempo de inatividade e o custo de operação (RELIASOFT CORPORATION, 2015).

Segundo (SILVEIRA, 2017), comumente se identifica a manutenção dependendo da sua natureza, as quais são classificadas em 6 tipos e podem ser vistas na Figura (7). No presente trabalho, o foco será em estabelecer uma política de manutenção preventiva baseada no tempo.

Figura 7. Tipos de Manutenção.



Fonte: (SILVEIRA, 2017).

Dentre os seis tipos de manutenção mostrados na Figura 7, para a implementação da técnica ideal de tempo de substituição é necessário definir apenas dois tipos que são as manutenções corretiva e preventiva, isso ficará mais evidente na próxima seção, na qual o método será explicitado.

Manutenção corretiva, é a manutenção realizada após a ocorrência de uma falha, em que não há nenhum mecanismo de detecção e/ou mitigação, em suma a manutenção corretiva consiste em reparar ou substituir o item que falhou.

Segundo (IEC, 2015) “manutenção preventiva é realizada para mitigar a degradação e reduzir a probabilidade de falha”, ou seja, é um procedimento rotineiro com sua execução pré-estabelecida em conformidade com o método estabelecido mediante às características de degradação do item, os procedimentos comumente adotados consistem em, ajustar, lubrificar, calibrar, trocar peças ou repará-las.

2.6.1 OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO

Quando se trata de otimização de manutenção, a principal motivação ressigna-se em obter o melhor resultado possível em circunstâncias restritas, sempre considerando prós e contras na tomada de decisão, a qual deve ponderar diversos critérios, incluindo custo, disponibilidade, segurança e lucro. A otimização da manutenção é realizada segundo duas filosofias, a otimização visando baixos custos e a otimização visando prover maior disponibilidade ao sistema (CAMPBELL e JARDINE, 2001).

A primeira pode ser compreendida como custos do ativo, trabalho, perda de produção e até mesmo a insatisfação do cliente com atraso na entrega de um produto. Todos os fatores são influenciados pelo desgaste ou quebra de determinado equipamento em uma cadeia produtiva. O menor custo obtido seria proveniente de uma política de manutenção na qual as peças do equipamento são substituídas tão tarde que possam prover um bom funcionamento ao sistema e tão cedo para que se tenha uma taxa de falhas aceitável (CAMPBELL e JARDINE, 2001).

A segunda filosofia possui como objetivo de otimização, prover um equilíbrio entre ações de retiradas de serviço do equipamento para manutenção preventiva e interrupções por avaria, em que o foco da otimização será a segurança, porém com impacto aceitável nos custos (CAMPBELL e JARDINE, 2001).

2.6.2 TEMPO ÓTIMO DE SUBSTITUIÇÃO

Para estabelecer planos de manutenção preventiva segundo a filosofia econômica, é necessário que os dados amostrados, os quais representam o comportamento estatístico de uma determinada população, obedeçam dois critérios básicos. O primeiro é que os equipamentos possuam uma taxa de falha crescente, ou seja, com aumento da quantidade de falha pode-se inferir que há desgaste no equipamento, configurando uma necessidade de manutenção preventiva. O segundo critério define que o custo total da ação de manutenção preventiva deve ser inferior ao custo global de uma ação corretiva, evidentemente que em situações nas quais as premissas não sejam verdadeiras não há sentido em realizar manutenção preventiva, pois será mais dispendiosa quando comparada com a corretiva, para tal ocorrência, opta-se por utilizar apenas a corretiva, ou outro tipo de manutenção (RELIASOFT CORPORATION, 2015).

A Técnica de estabelecimento de tempo ideal para substituição é empregada em manutenções preventivas e consiste em equalizar os custos devido à substituição preventiva durante procedimentos de manutenção preventiva com os custos de reparos não planejados. Para tanto é necessário estabelecer a melhor distribuição de probabilidade mediante aos tempos de falhas do item estudado, e a posteriori é possível ponderar o custo adicional para uma substituição não planejada em relação a uma planejada, com o dispêndio de desistir de alguma vida útil do item, substituindo-o antes da falha ocorrer por desgaste (CROCKER, KNEZEVIC e HARAM, 2000).

Segundo (CROCKER, KNEZEVIC e HARAM, 2000) existem duas políticas de estabelecimento do intervalo ideal de substituição, as quais possuem o objetivo de mitigar a soma do custo de manutenção não planejada e custo de substituição planejada, denominadas por substituição de idade e substituição de bloco.

A política de substituição por idade é baseada segundo a necessidade de substituição de um item em caso de falha ou uma idade específica. A manutenção preventiva nesse caso é realizada em conformidade com a idade operacional crítica alcançada de um item, se o item vier a falhar antes do intervalo de tempo estabelecido, uma substituição deste é realizada e será remarcada a próxima substituição preventiva. (ALBRICE, 2017).

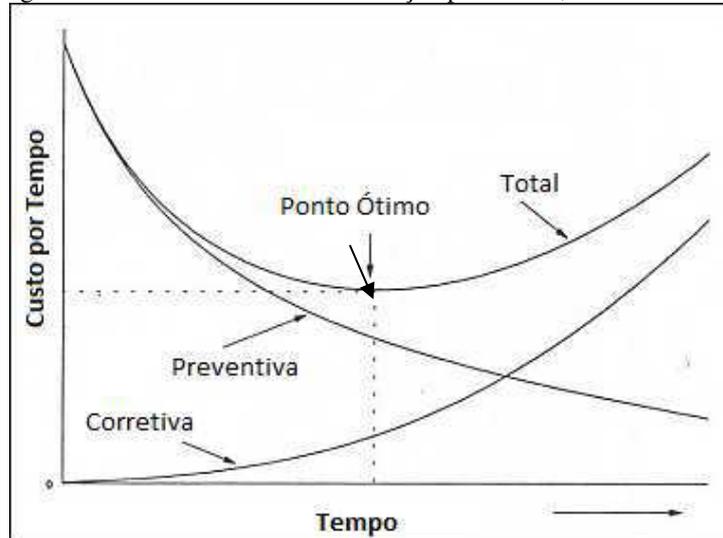
Na política de substituição por blocos, diferentemente da anterior, as idades dos itens não definem a política de substituição, todos os itens podem ser substituídos periodicamente, independentemente de sua idade de uso. Além disso, unidades com defeito poderão vir a ficar ociosas na ocorrência de uma determinada quantidade de falhas, que não seja a quantidade especificada para execução de uma substituição de bloco (ALBRICE, 2017).

2.6.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Conforme já discutido, as falhas por desgaste podem ser mitigadas empregando a manutenção preventiva. Para tanto, é necessário realizar a implementação de uma política de substituição adequada, na qual deve-se entender que custo da falha por unidade de tempo depende da manutenção preventiva, que pode ser realizada muitas vezes, ao passo que o custo total de unidade de manutenção aumenta. Portanto, o ideal é identificar o cronograma no qual se obtenha um ponto ótimo que venha a produzir um custo total mínimo por unidade de tempo (DODSON e NOLAN, 1999).

Na Figura 8 pode ser visto um gráfico no qual é possível identificar o ponto ótimo, e, portanto, para realizar a implementação matemática dos modelos de substituição por idade e bloco, é necessário identificar os custos envolvidos para o item submetido ao estudo.

Figura 8. Curvas de custo de manutenção preventiva, corretiva e total.



Fonte: (DODSON e NOLAN, 1999)

Para o cálculo dos custos de manutenção corretiva é utilizada a equação (25) e devem ser considerados, além do material e da mão-de-obra envolvida na atividade de reparo do componente, o custo das perdas causadas pelo lucro cessante. A manutenção preventiva comumente é realizada em conjunto com a operação, por este motivo o custo de manutenção preventiva é calculado de acordo com a equação (26), em que não há perda por lucro cessante (SILVEIRA, 2012).

$$C_f = C_{MO} + C_{Mt} + C_{LC} \quad (25)$$

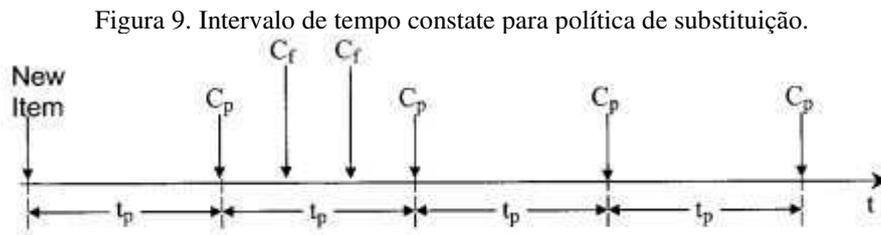
em que C_f é o custo da manutenção corretiva, C_{LC} é custo do lucro cessante e C_{MO} é o custo da mão de obra que é dada pelo produto entre quantidade de colaboradores pelo tempo de reparo multiplicado pelo custo da hora do colaborador.

$$C_p = C_{MO} + C_{Mt} \quad (26)$$

em que C_p é o custo da manutenção preventiva, C_{Mt} é o custo do material empregado na manutenção.

1.1.1.2 SUBSTITUIÇÃO POR BLOCO

Neste caso a substituição é realizada sempre no intervalo de tempo $t = t_p$, mesmo com a possibilidade de ocorrência de falha antes do intervalo estabelecido. Na Figura 9 pode ser observada a ocorrência de substituições em intervalos de tempo sempre igualmente espaçados.



Fonte: (CAMPBELL e JARDINE, 2001)

Na construção do modelo matemático segundo (CAMPBELL e JARDINE, 2001) a obtenção do custo total por unidade de tempo é dada por meio do desenvolvimento da equação (27) abaixo:

$$C(t_p) = \frac{\text{Custo total esperado no intervalo } (0, t_p)}{\text{Largura do intervalo}} \quad (27)$$

em que o custo total esperado é igual a soma do custo da substituição preventiva e o custo esperado por uma substituição por falha, dado por $C_p + C_f H(t_p)$, onde $H(t_p)$ é o número de falhas esperadas no intervalo $(0, t_p)$. Logo a equação (28) é expressa pela equação (28) abaixo:

$$C(t_p) = \frac{C_p + C_f H(t_p)}{t_p} \quad (28)$$

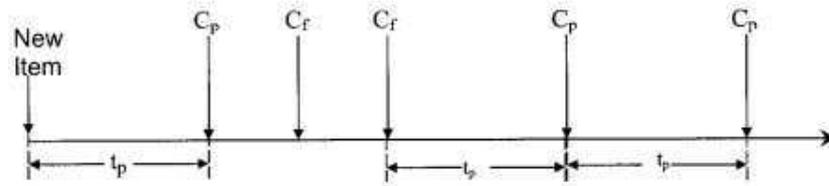
Segundo (RELIASOFT CORPORATION, 2015) sem a manutenção preventiva, os custos de perda e de tempo de produção mediante a quebra do equipamento será incorrida. Além disso, a manutenção preventiva resultará em economias devido ao possível aumento da vida útil do sistema. Os benefícios a longo prazo da manutenção preventiva incluem:

- Maior confiabilidade do sistema.
- Diminuição do custo de substituição.
- Diminuição do tempo de inatividade do sistema.
- Melhor gerenciamento de estoques de peças sobressalentes.

1.1.1.3 SUBSTITUIÇÃO POR IDADE

Neste caso, o intervalo começará no instante $t = 0$, e acabará no momento em que ocorrer uma falha ou substituição. O tempo de substituição é dado por t_p conforme pode ser observado na Figura 10, onde C_p é custo da manutenção preventiva e C_f é custo da ocorrência de uma falha.

Figura 10. Política de substituição por idade.



Fonte: (CAMPBELL e JARDINE, 2001)

A obtenção do modelo matemático desta política de manutenção também consiste na obtenção do custo total por unidade de tempo. Segundo (CAMPBELL e JARDINE, 2001) de forma análoga a anterior, o equacionamento é dado pelo desenvolvimento da equação 29 abaixo:

$$C(t_p) = \frac{\text{Custo total esperado por ciclo}}{\text{Largura esperada do ciclo}} \quad (29)$$

em que *Custo total esperado por ciclo* é dado pelo produto da soma entre o custo preventivo por ciclo e a função densidade acumulada mais o custo por falha e a função sobrevivência. A largura esperada por ciclo é definida como a integral da função sobrevivência no intervalo $(0, T)$, conforme pode ser visto na equação 30.

$$C(t_p) = \frac{C_f \cdot F(t) + C_p \cdot R(t)}{\int_0^T R(t) dt} \quad (30)$$

Finalmente, resta definir o tempo ótimo para implementação das duas políticas de substituição, em que o objetivo será minimizar o custo por substituição, para tanto deve-se derivar $C(T_p)$, em relação ao tempo e igualar a zero conforme é observado na equação (31):

$$\frac{\partial C(t_p)}{\partial t} = 0 \quad (31)$$

3 METODOLOGIA

No decorrer deste Capítulo será apresentada a metodologia adotada para abranger os objetivos quanto a realização do estudo de caso, incluindo os instrumentos utilizados para coleta e análise dos dados, cenários, sujeitos e abordagem.

O estudo de caso proposto se configura como uma pesquisa quantitativa, e será desenvolvida utilizando um banco de dados real de equipamentos que constituem o subsistema de acionamento das portas de uma composição de um metrô. Os dados são coletados pela empresa e armazenados em seu banco de dados no departamento de manutenção. O acesso a essas informações foi proporcionado mediante à solicitação realizada junto ao coordenador de manutenção. Para tanto foi criada uma planilha padrão pelo autor do presente trabalho, vide anexo I, esta foi devidamente preenchida pela equipe do departamento de manutenção e reenviada para o autor.

Os objetos de estudo serão três equipamentos conforme pode ser observado na Tabela 9, os quais são descritos segundo seus respectivos modos de falha, ou seja, serão estabelecidos tempos ótimos de manutenção desses itens de cada equipamento, em que o objetivo é mitigar os custos excessivos e desnecessários de manutenções preventivas ou um custo elevado com manutenção corretiva, que geralmente é bem mais cara quando comparada com a anterior.

Tabela 9. Equipamentos e Modos de Falha.

Equipamento	Modo de falha
DCU (<i>Door Control Unit</i>)	Motor Elétrico
Conjunto de deslizamento	Fuso
Equipamento elétrico	Pantógrafo

Fonte: autoria própria

Os estudos de confiabilidade serão realizados com auxílio do *software* Minitab®, no qual é possível conduzir análises a fim de calcular as principais medidas de confiabilidade, parâmetros e obtenção de gráficos que auxiliam na compreensão do comportamento estatístico do objeto de estudo. Uma descrição detalhada das análises que serão empregadas, encontra-se descrita conforme pode ser visto na Tabela 10.

Tabela 10. Métodos utilizados no Minitab.

Tipo de Análise	Ferramenta	Funcionalidade
Identificação de distribuição de probabilidade	Teste de aderência (AD) e valor-p	Determinar qual distribuição de probabilidade melhor representa a amostra de dados
Estimar parâmetros da distribuição de probabilidade	Gráfico de Probabilidade	Estabelecer os parâmetros de escala e forma da distribuição de probabilidade
Principais funções de confiabilidade	Visão geral da distribuição probabilidade	Obter os gráficos de $R(t)$, $f(t)$ e $h(t)$

Fonte: Autoria própria

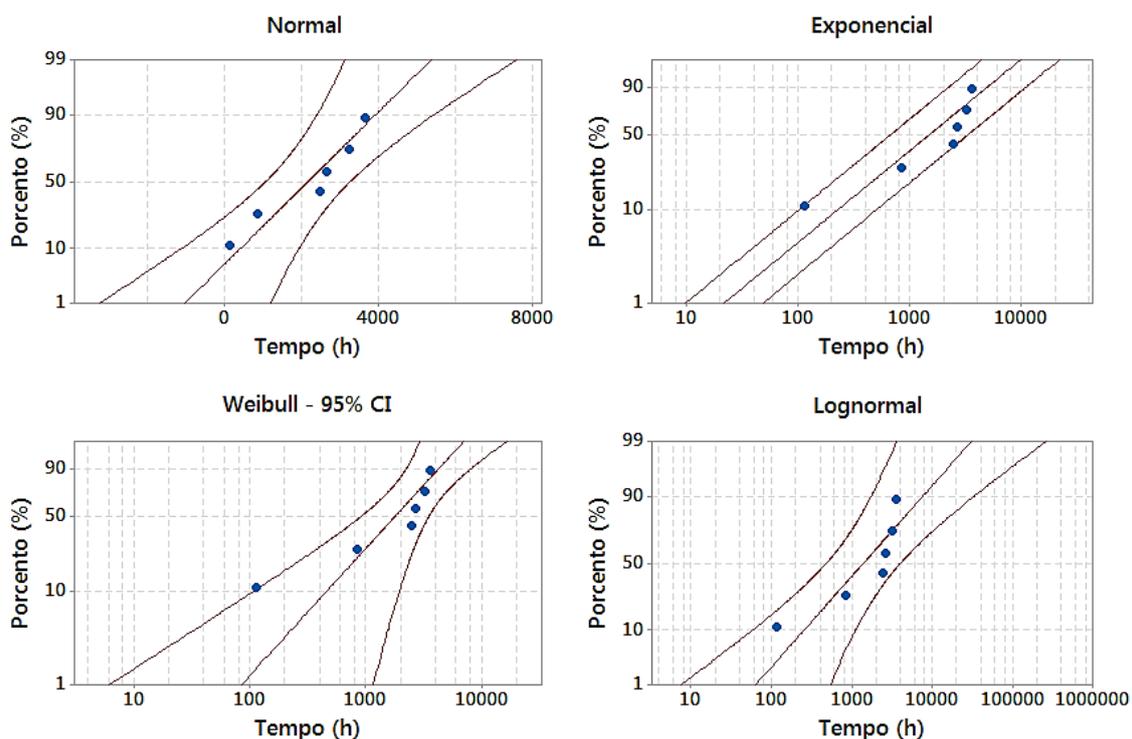
Para definição da política de manutenção preventiva será utilizado o *software* Weibull ++®, presente na suite desenvolvida pela Reliasoft®, devido ao fato que *software* possui disponível em suas funções a ferramenta para análises de planos de manutenção, que é adequada para esta análise.

4 ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Mediante o acesso dos dados de manutenção, se dá o início da condução de estudo caso. Para tanto, é necessário conhecer a natureza dos dados coletados e assim estabelecer qual tipo de censura estão submetidos. Para o banco de dados coletado foi verificado que os mesmos são categorizados como não censurados, pois os tempos de falha de cada item são coletados exatamente quando falham.

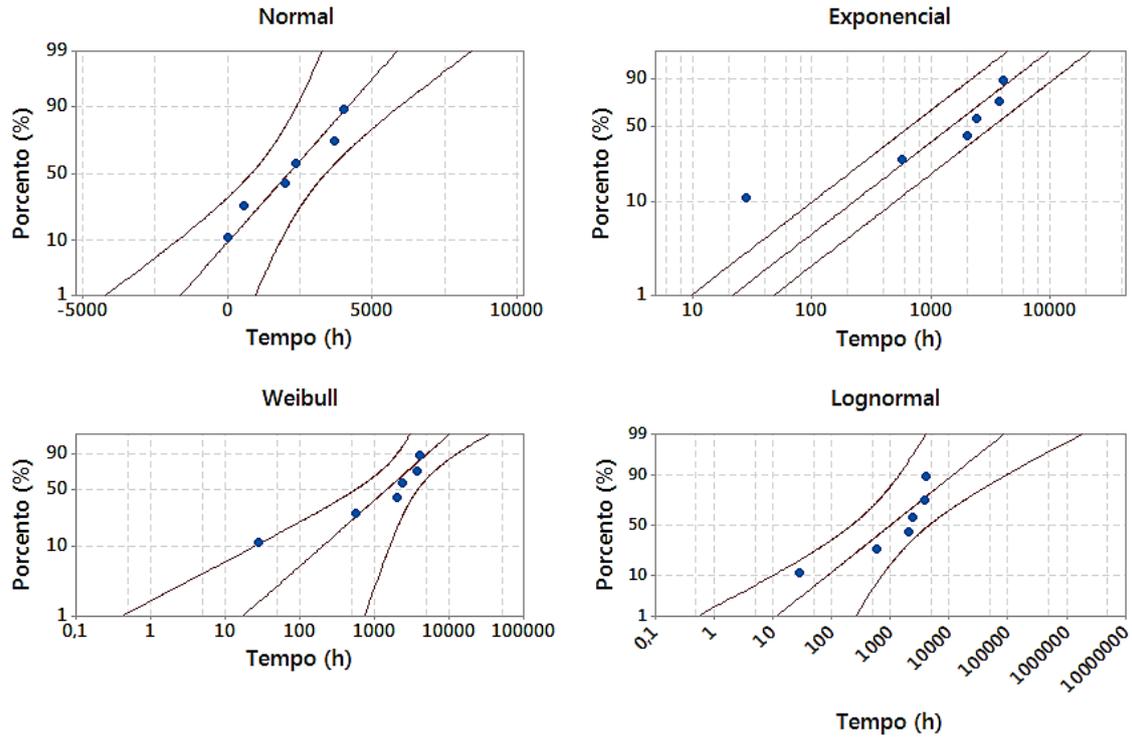
A priori, com auxílio do Minitab®, é necessário estabelecer qual distribuição de probabilidade para a amostra coletada possui melhor aderência. Com isso, são avaliados os resultados dos testes de aderência a (AD) e seus respectivos testes-p, conforme pode ser visto nas Figuras 11, 12 e 13 e na Tabela 11.

Figura 11. Teste de aderência para o motor elétrico, gráficos de probabilidade.



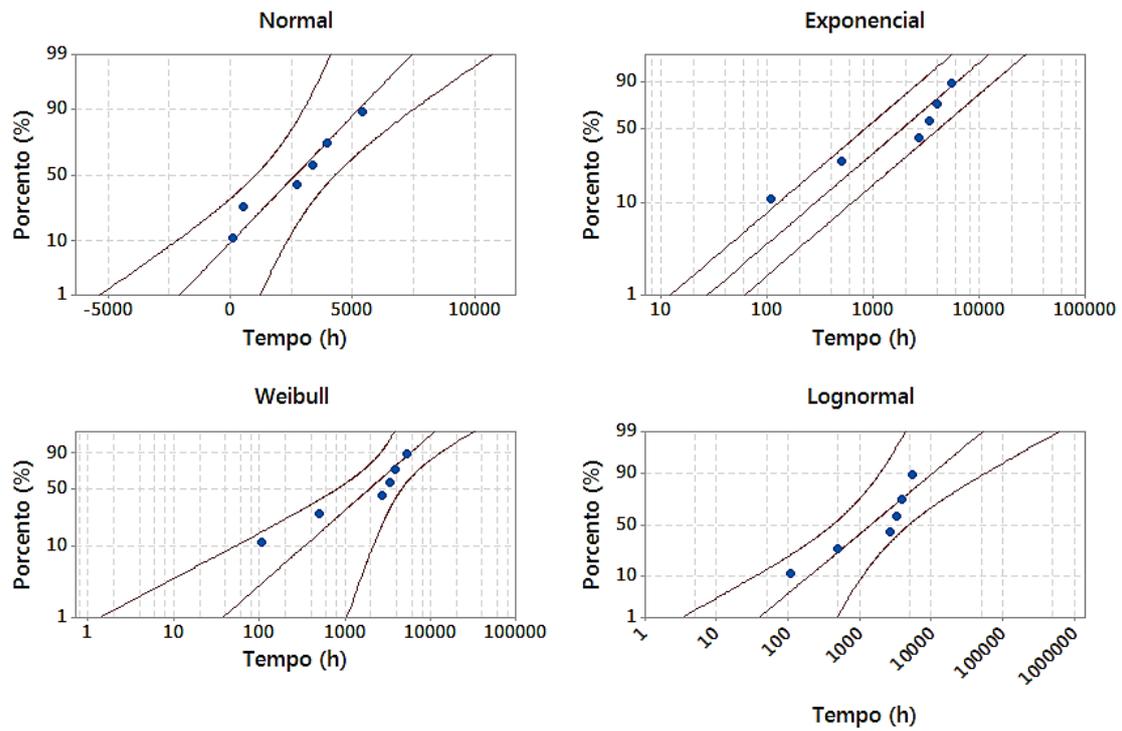
Fonte: autoria própria.

Figura 12. Teste de aderência para o fusão, gráficos de probabilidade.



Fonte: autoria própria.

Figura 13. Teste de aderência para o pantógrafo, gráficos de probabilidade.



Fonte: autoria própria.

Para o conjunto de gráficos acima, são plotadas as funções de probabilidade acumulada linearizadas. Os pontos em azul representam os dados de tempos de falha coletados e aplicados em cada modelo probabilístico. A linha central em vermelho representa o comportamento probabilístico esperado para cada função de probabilidade, as outras duas linhas em vermelho, representam o intervalo de confiança inferior e superior.

Tabela 11. Resultados dos testes AD e p.

Itens	Testes de aderência		
	Distribuição	AD	P
Motor Elétrico	Normal	0,323	0,397
	Exponencial	0,607	0,306
	Weibull	0,638	0,078
	LogNormal	0,693	0,034
Fuso	Distribuição	AD	P
	Normal	0,241	0,625
	Exponencial	0,558	0,359
	Weibull	0,546	0,143
	LogNormal	0,506	0,232
Pantógrafo	Distribuição	AD	P
	Normal	0,242	0,621
	Exponencial	0,501	0,434
	Weibull	0,535	0,153
	LogNormal	0,655	0,044

Fonte: autoria própria.

Tendo em vista a análise anterior e segundo (MINITAB, INC, 2017), sabe-se que no Minitab® a estatística de AD é usada para calcular o valor-p para o teste de qualidade do ajuste, então cabe avaliar apenas o resultado do teste p para concluir o teste de aderência. Na ausência do cálculo do valor-p pelo *software*, seja por falta de convergência ou no emprego de dados censurados, opta-se pela distribuição de probabilidade que obtiver o menor valor de AD.

No Minitab® a hipótese nula H_0 é definida como “os dados seguem determinada distribuição de probabilidade”, enquanto a hipótese alternativa H_a é definida como “os dados não seguem determinada distribuição de probabilidade”. Conforme discutido no referencial teórico, sabe-se para valores do teste - p maiores ou iguais a 0,10 tem-se pouca ou nenhuma evidência contra H_0 .

Baseado na estatística de AD e valor-p, define-se que a melhor distribuição de probabilidade para representar o conjunto de dados dos três equipamentos é a distribuição normal. Com isso foram estimados os parâmetros de localização, forma e escala da distribuição de probabilidade conforme é observado Tabela 12, em que se definiu como

método numérico a ser empregado, o da máxima verossimilhança, pois segundo (MINITAB INC, 2017), para um conjunto restrito de dados esse método numérico produz melhores aproximações, quando comparado com o método dos mínimos quadrados.

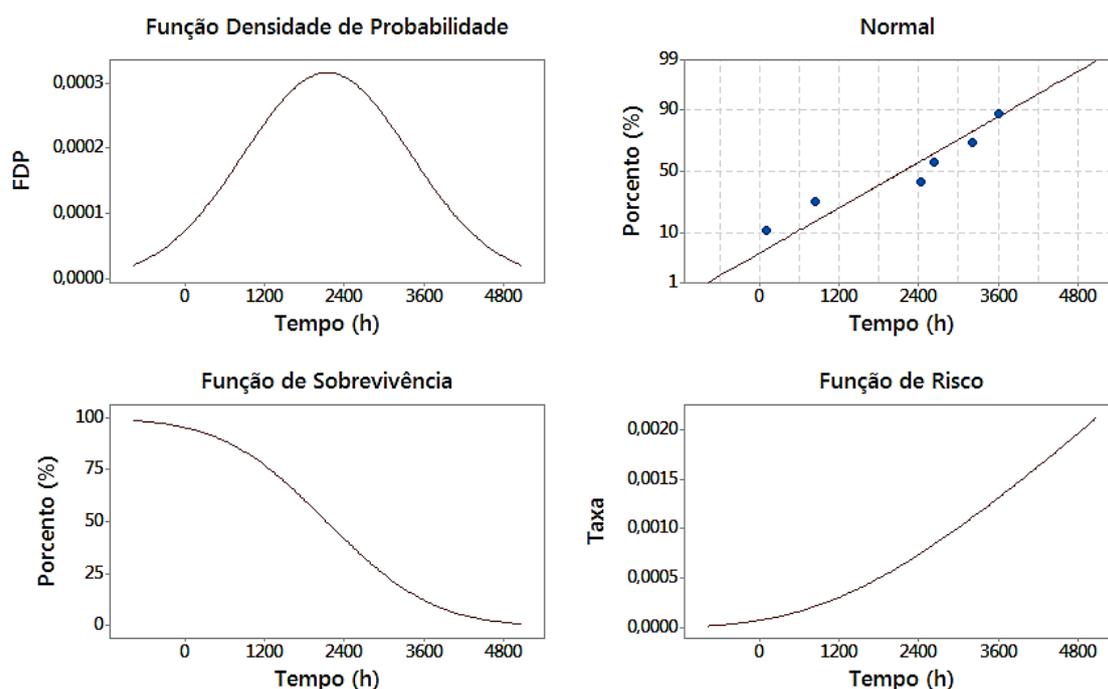
Tabela 12. Parâmetros da distribuição de probabilidade.

Itens	Parâmetros			
	Distribuição	Localização	Forma	Escala
Motor Elétrico	Normal	2147	-	1376,73
	Distribuição	Localização	Forma	Escala
Fuso	Normal	2116,67	-	1612,54
	Distribuição	Localização	Forma	Escala
Pantógrafo	Normal	2670,83	-	2044,26
	Distribuição	Localização	Forma	Escala

Fonte: autoria própria.

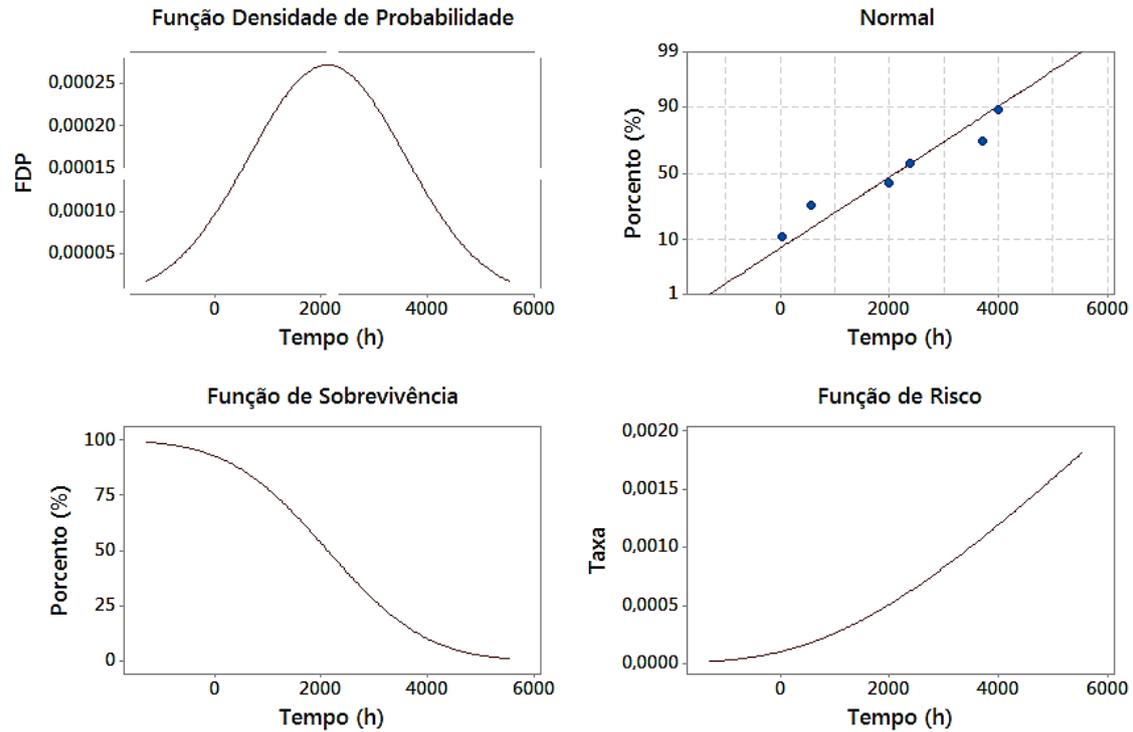
O segundo passo a ser realizado é estimar as principais medidas de confiabilidade. Para tanto, se fez uso da ferramenta de análise de visão geral da distribuição de probabilidade, presente no Minitab®. Os resultados obtidos podem ser vistos conforme as Figuras 14, 15 e 16. Na Tabela 13 pode ser visto de forma sumarizada as medidas de confiabilidade obtidas, que são a grande motivação na condução de um estudo de confiabilidade.

Figura 14. Visão geral da distribuição para o motor elétrico.



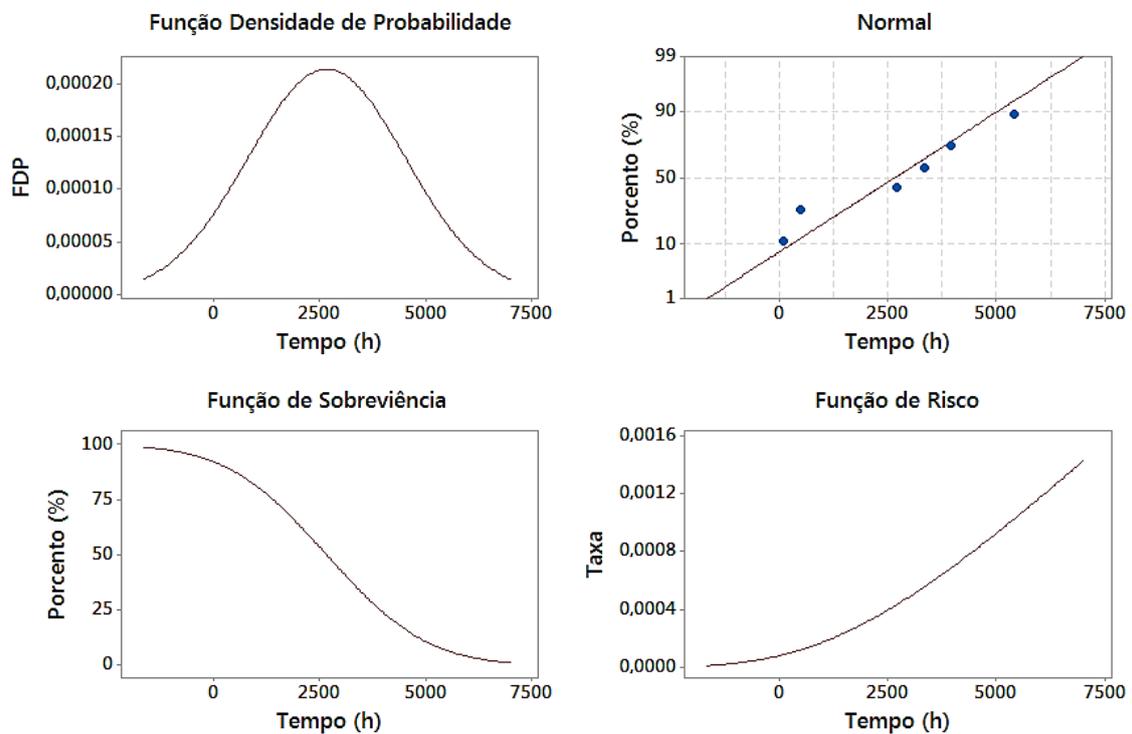
Fonte: autoria própria.

Figura 15. Visão geral da distribuição para o fuso.



Fonte: autoria própria.

Figura 16. Visão geral da distribuição para o pantógrafo.



Fonte: autoria própria

Tabela 13. Principais medidas de confiabilidade.

Itens	Parâmetros			
	MTTF (h)	$F(t)$ (%)	$R(t)$ (%)	$h(t)$
Motor Elétrico	2147	50,08	49,92	0,065
	MTTF (h)	$F(t)$ (%)	$R(t)$ (%)	$h(t)$
Fuso	2116,67	49,57	50,43	0,055
	MTTF (h)	$F(t)$ (%)	$R(t)$ (%)	$h(t)$
Pantógrafo	2670,83	50,28	49,72	0,044
	MTTF (h)	$F(t)$ (%)	$R(t)$ (%)	$h(t)$

Fonte: autoria própria

A primeira medida de confiabilidade obtida foi MTTF, que indica o tempo médio até ocorrência de falha de cada equipamento, portanto a expectativa de vida para cada equipamento avaliado é descrito segundo os valores presentes na coluna denominada MTTF da tabela anterior. Com base nos valores de MTTF, foram obtidas as demais medidas de confiabilidade. Para tanto foi utilizada uma ferramenta denominada *crosshairs*, a qual possui a função de explorar os gráficos obtidos nas análises no Minitab®.

O que pode ser extraído dos resultados obtidos nas colunas denominadas por $F(t)$ e $R(t)$, no caso do fuso por exemplo, em 2116,67 horas há 49,57% de chance do equipamento falhar, e conseqüentemente 50,3% de chance do equipamento sobreviver, ou seja, de cada 100 equipamentos 50,3 sobrevivem sem falhar no tempo médio para falhar do equipamento. Por fim, ainda tomando como base o fuso, na última coluna, tem-se $h(t) = 0,055$, ou seja, a quantidade de risco associado ao equipamento no tempo médio para falhar é de 0,055 falhas.

Além das medidas de confiabilidade, foi possível verificar que para os três equipamentos as funções de riscos são crescentes, logo atendem à primeira condição para implementação do plano de manutenção. Ademais, os custos observados de manutenção preventiva são menores do que os de manutenção corretiva para os três equipamentos, conforme pode ser visto no anexo I. Portanto, a segunda condição necessária à definição do plano de manutenção foi atendida, justificando sua implementação.

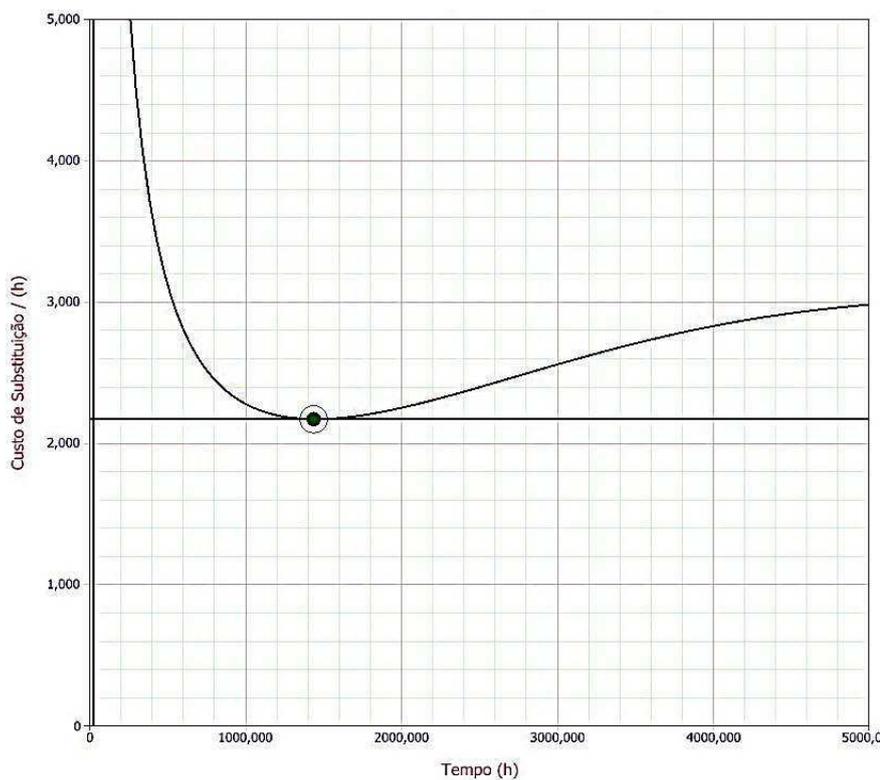
A próxima etapa do experimento é conduzida empregando o *software* Weibull++® da suite Reliasoft®, no qual é possível realizar análises para otimização do tempo de manutenção preventiva ou substituição de itens e ou equipamentos. Com isso, garante-se que esses possam ser bem aproveitados até o limite de sua confiabilidade sem

que haja prejuízos por mal funcionamento, além disso mitigar os custos desnecessários de manutenção. As ações de manutenção a serem realizadas, são preconizadas pelo fabricante e para cada equipamento, deve-se:

- Motor elétrico: desobstruir o trilho, lubrificar o grupo mecânico de transmissão de força, verificar a corrente do motor em operação;
- Fuso: lubrificar o fuso, verificar se no fechamento e abertura o eixo está trabalhando alinhado, verificar se não há nenhuma ranhura amassada e verificar os mancais de deslizamento;
- Pantógrafo: verificar o prazo de validade, reaplicar a massa pantográfica, verificar o fole que infla a bolsa pneumática, e verificar a tensão aplicada nos grupos de mola primário e secundário.

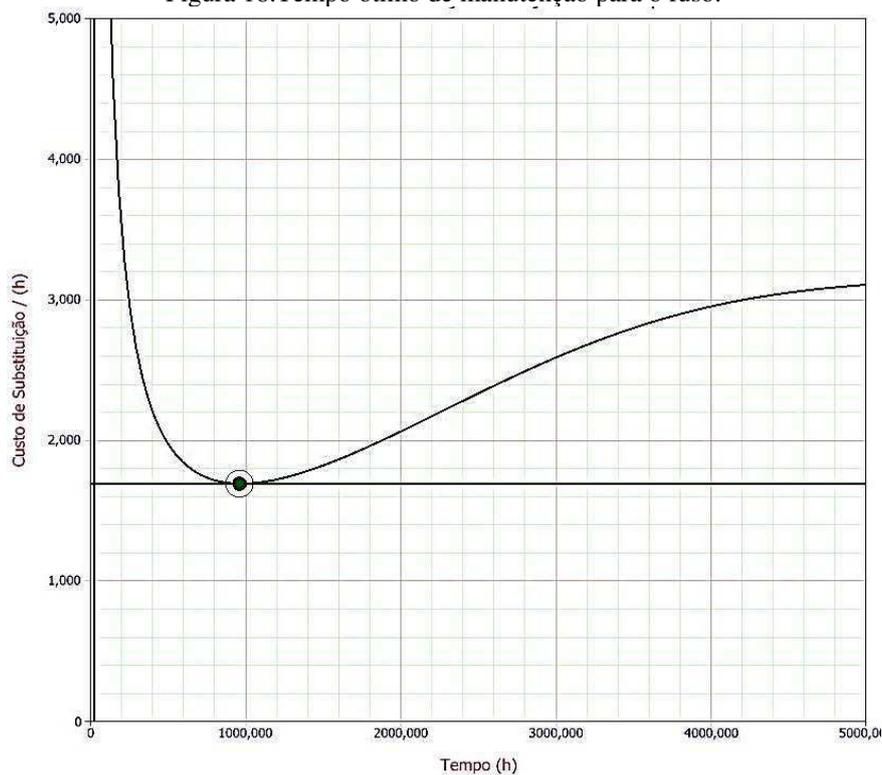
Os resultados obtidos nesta etapa podem ser vistos conforme as Figuras 17, 18 e 19 assim como na Tabela 14.

Figura 17. Tempo ótimo de manutenção para o motor.



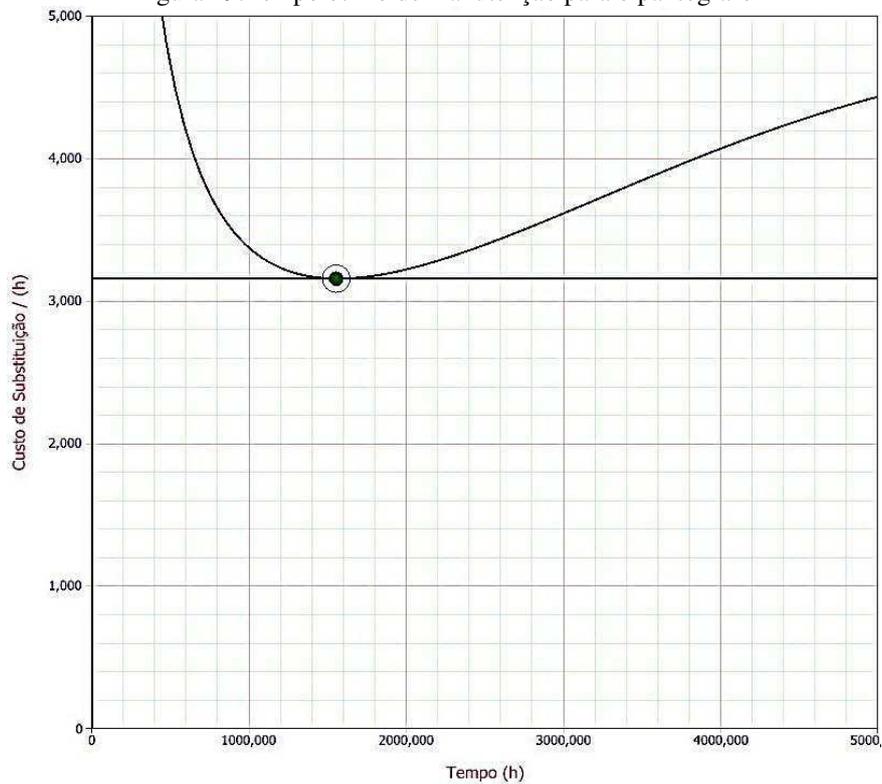
Fonte: autoria própria

Figura 18. Tempo ótimo de manutenção para o fuso.



Fonte: autoria própria

Figura 19. Tempo ótimo de manutenção para o pantógrafo



Fonte: autoria própria

Tabela 14. Custos e tempos ótimos de manutenção preventiva.

Itens	Preço/hora R\$/h	Tempo ótimo Horas
Motor Elétrico	1,693	971,075
Fuso	2,172	1447,362
Pantógrafo	3,159	1566,149

Fonte: autoria própria.

Para cada equipamento foi determinado, segundo a política de substituição por idade, o melhor momento para realizar as atividades de manutenção preventiva. O custo esperado por hora, ao adotar nova política de manutenção, pode ser visto na coluna central, assim como na última coluna tem-se o melhor momento para realização das atividades de manutenção nos equipamentos. Portando uma projeção do custo total que é esperado gastar com tal política é dado pelo produto entre o preço por hora e o tempo ótimo de substituição.

Os resultados obtidos foram comparados com o plano de manutenção estabelecido pelo fabricante dos equipamentos, e todos ficaram dentro das faixas estabelecidas. Por orientação da equipe não foi possível divulgar o documento com os dados de manutenção fornecidos pelo fabricante, por se tratar de segredo industrial, porém é possível criar uma Tabela para fins de comparação e validação do método empregado conforme pode ser visto na Tabela 15.

Tabela 15. Comparação entre os tempos de manutenção obtidos e fornecidos pelo fabricante.

Itens	Tempo estimado pelo fabricante (h)	Tempo estimado calculado (h)
Motor Elétrico	875 ± 320	971,075
Fuso	1750 ± 320	1447,362
Pantógrafo	1600 ± 320	1566,149

Fonte: autoria própria.

Cabe destacar, que ao definir os planos de manutenção, o fabricante do equipamento não levará em conta os custos de lucro cessante e mão de obra, uma vez que esses valores são definidos a depender da aplicação e custos intrínsecos a cada região na qual o sistema será posto em funcionamento.

Conforme pode ser observado na Tabela 16, os custos totais da manutenção preventiva foram otimizados quando comparados com os custos de manutenção corretiva. Um dos fatores que leva a tamanha diferença é que o lucro cessante médio para cada composição é alto, por se tratar da interrupção de um serviço de alta demanda. O que pode ser avaliado neste caso é que o custo para deixar o equipamento falhar, sem promover às devidas atividades de manutenção, chega em média a três vezes e meia a mais do valor de empregar a manutenção preventiva, e portando pelo viés econômico está concretizado o emprego desta nos equipamentos avaliados.

Tabela 16. Comparação entre os custos de manutenção obtidos com os custos da corretiva.

Itens	Custo Total Otimizado R\$/h	Custos Total não Otimizado R\$/h	Economizado (%)
Motor Elétrico	1,693	3,00	43,57
Fuso	2,172	3,70	41,30
Pantógrafo	3,159	4,35	27,38

Fonte: autoria própria.

5 CONCLUSÃO

No estudo de caso, foi possível alinhar as análises realizadas com a teoria, uma vez que foram aplicados todos os métodos descritos no referencial teórico, mais especificamente, os métodos de inferência estatística para validação do modelo probabilístico, os métodos para cálculo dos parâmetros e medidas de confiabilidade, assim como a otimização da manutenção, onde ficou claro os possíveis retornos econômicos provenientes da política de manutenção proposta, além de prover maior confiabilidade em todos os equipamentos. Sendo assim conclui-se que os objetivos os quais são propostos no presente trabalho foram alcançados.

Neste trabalho, foi estabelecido que distribuição de probabilidade, que melhor representa a amostra de todos os dados é a distribuição normal, tal fato foi constatado por meio dos testes de aderência propostos. Além disso, por meio das informações fornecidas pelos fabricantes dos equipamentos, quanto aos tempos de manutenção, foi possível validar a política de manutenção proposta, em que todos os resultados obtidos estão em conformidade com os intervalos de manutenção recomendados nos manuais. Em contrapartida, além do tempo ótimo de manutenção preventiva, foi possível calcular os custos envolvidos, e quando comparados com os custos relacionados a política de manutenção corretiva, há pelo menos 27% de economia no pior caso que é do pantógrafo e 43% no melhor caso, que é do motor elétrico.

Uma das limitações deste estudo está presente no tipo de informação que foi possível coletar, aparentemente não há um detalhamento mais profundo, na detecção dos modos de falha, tornado a análise um tanto quanto incompleta. Idealmente caberia no plano de manutenção identificar o tempo ótimo para substituição de cada componente, mediante a detecção dos seus respectivos modos de falha. Para tal caberia a equipe realizar estudos mais detalhados, empregando FEMA (*failure mode and effect analysis*).

Cabe destacar que a execução de manutenção preventiva não exclui a possibilidade de manutenções corretivas, outrossim o estabelecimento do tempo ótimo não se torna irrevogável, pois além da manutenção é necessário levar em consideração a operação do sistema como um todo. Portanto define-se que a realização da manutenção corretiva será realizada ao término de cada intervalo obtido e caso ocorra uma falha,

havendo a necessidade de manutenção corretiva, esta será realizada e uma nova manutenção preventiva será agendada.

Os métodos estatísticos empregados neste trabalho são os mais comuns, porém é possível considerar outras abordagens, como por exemplo o método Kolmogorov-Smirnov para verificação da hipótese de aderência dos modelos probabilísticos, assim como incluir novas análises considerando outras distribuições de probabilidade. Também é possível estimar a confiabilidade total do sistema, para tanto se utiliza de técnicas de confiabilidade estrutural, como por exemplo simulação de monte carlo e árvores de falhas. Adicionalmente é possível estimar a disponibilidade do sistema, e projetar horizontes de indisponibilidade de equipamentos no sistema, para tal é necessário coletar mais informações junto à equipe de manutenção.

Os estudos adicionais supracitados podem ser levados a frente e tomados como novas abordagens em trabalhos futuros, os quais podem ser integrados as novas técnicas que vem surgindo no mercado. Por fim, é necessário comentar que a principal dificuldade enfrentada para realização deste trabalho, foi a coleta dos dados, pois uma parte massiva das empresas não aplicam técnicas de manutenção, ou ao menos possuem bancos de dados de suas falhas, simplesmente espera-se que o equipamento falhe para que alguma medida seja tomada. Outro horizonte para futuros trabalhos é criar mecanismos de coleta e identificação de modos de falha, para tanto pode ser tomado como base estudos de (FEMA) e implementar planos de gerenciamento de coleta de dados e riscos associados a cada item no sistema.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINO, R. B. D. **Goodness of Fit Techniques**. New York: Marcel Dekker, 1986.p.271.
- ALBRICE, D. Age Based Replacement Policy (ARP). **assetinsights**, 2017. Disponível em: <http://www.assetinsights.net/Glossary/G_Age_Based_Replacement_Policy.html>. Acesso em: 18 mar. 2017.
- ALBRICE, D. Block Replacement Policy (BRP). **assetinsights**, 2017. ISSN http://www.assetinsights.net/Glossary/G_Block_Replacement_Policy.html. Acesso em: 18 mar. 2017.
- BLISCHKE, W. R.; MURTHUY, N. D. P. **Case Studies in Reliability and Maintenance**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003. p. 5.
- CAMARGO, C. C. D. B. **Confiabilidade Aplicada a Sistemas de Potência Elétrica**. Rio de Janeiro: LTC / ELETROBRÁS / FEESC, 1981. p. 24- 33.
- CAMPBELL, J. D.; JARDINE, A. K. S. **Maintenance Excellence: Optimizing Equipment Life - Cycle Decisions**. New York : Marcel Dekker, Inc., 2001. p.269 - 435.
- CLAYTON STATE UNIVERSITY. The Meaning and Interpretation of P-values (what the data say?), 2012. Disponível em: <<http://www.clayton.edu/Portals/323/Imported/business.clayton.edu/arjomand/business/p-value.htm>>. Acesso em: 18 mar. 2017.
- CROCKER, J.; KNEZEVIC, J.; HARAM, M. -. **Reability, Maintenance and Logistic Support - A Life Cycle Approach**. Calcutta: Springer Science+Business Media Dordrecht, B. V., 2000. p. 208
- DODSON, B.; NOLAN, D. **Reliability Engineering Handbook**. New York: Marcel Dekker, 1999. p.171 - 172.
- FOGLIATO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio De Janeiro: Elsevier, 2009. p. 2 -163.
- GARVIN, D. A. Competing in the eight dimensions of quality. **Harvard Business Review**, p. 101-109, 2009.
- HINES, W. W. et al. **Probability and Statistica in Engineering**. 4ª. ed. Danvers: John Wiley & Sons, Inc., 2003. p. 36 - 44.
- IEC. **International Eletrotechnical Vocabulary**. International Eletrotechnical Commission, Area: Dependability / Maintenance and maintenance support related concepts. [S.l.]: IEC. 2015.
- KNIGHT, C. R. Four Decades of Reliability Progress. **Annual Reliability and Maintainability Symposium**, 1991. 156-160.
- LEEMIS, J. Reliability: probabilistic models and statistical methods. In: J, L. **Reliability: probabilistic models and statistical methods**. Nova York: PrenticeHall, 1995. p. 384.
- MEEKER, W. O.; ESCOBAR, L. A. **Statistical Methods for Reliability Data**. New York: JOHN WILEY & SONS, INC, 1998. p.29.

MINITAB INC. Aprendendo Estatística: Antes e depois do Minitab, 06 Dezembro 2016. Disponível em: <<https://www.minitab.com/pt-br/News/Aprendendo-estat%C3%ADstica--Antes-e-depois-do-Minitab/>>. Acesso em: 06 dez. 2016.

MINITAB INC. Método de estimativa de mínimos quadrados e estimativa da máxima verossimilhança. **Suporte ao Minitab 17**, 2017. Disponível em: <<http://support.minitab.com/pt-br/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/reliability/parameter-estimates/least-squares-and-maximum-likelihood-estimation-methods/>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

MINITAB, INC. Como a estatística de Anderson-Darling é usada para avaliar o ajuste de distribuição. **Suporte ao Minitab 17**, 2017. Disponível em: <<http://support.minitab.com/pt-br/minitab/17/topic-library/quality-tools/capability-analyses/distributions-and-transformations-for-nonnormal-data/anderson-darling-and-distribution-fit/>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. D. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. p.352 - 374.

NASCIF, J. Manutenção de Classe Mundial. **Revista Manutenção e Qualidade**, p. 8, 2000.

NETO, A. B. D. O.; MORAES, V. S. ERIAC. **Metodologia para Análise da Confiabilidade de Equipamentos do Sistema de Geração Solar Fotovoltaico Empregando Dados de Falhas**, Ciudad del Este, abr. 2017.

NIST/SEMATECH. Anderson-Darling Test. **Engineering Statistics Handbook**, 1 jun. 2003. Disponível em: <<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35e.htm>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

PORTAL ACTION. Distribuição Exponencial. **Portal Action**, 2017. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/probabilidades/612-distribuicao-exponencial>>. Acesso em: 11 mar. 2017.

RELIASOFT CORPORATION. **System Analysis Reference: Reliability, Availability & Optimization**. Tucson: Creative Commons, 2015.p.215.

SILVEIRA, C. B. Confiabilidade e disponibilidade. **Citisystems**, 2012. Disponível em: <<http://www.citisystems.com.br/confiabilidade-disponibilidade-maquinas>>. Acesso em: 19 mar. 2017.

SILVEIRA, C. B. Os 6 Tipos de Manutenção na Indústria. **Citisystems**, 2017. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/tipos-manutencao-industria/>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

SPANÓ, C. Confiabilidade na Gestão Estratégica. **BWS Consultoria**, 06 Dezembro 2016. Disponível em: <<http://www.bwsconsultoria.com/2011/05/confiabilidade-na-gestao-estrategica.html>>. Acesso em: 06 dez. 2016.

ANEXO I

Descrição do Equipamento			
Equipamento/Identificação	Item	Modo Potencial de Falha	Identificação
DCU (Door Control Unit)	Motor elétrico	Interrupção no fechamento	1
Conjunto de deslizamento	Fuso	Desalinhamento axial	2
Equipamentos elétricos	Pantógrafo	Desgaste excessivo	6

Tempos de Falha dos Equipamentos		
TTF1 horas	TTF2 horas	TTF3 horas
114	28	107
3618	3722	5408
3218	4006	3946
2644	2378	3358
844	564	496
2444	2002	2710

Custos Com Manutenção					
Custos Preventiva			Custos corretiva		
Item	Mão de Obra R\$	Material R\$	Mão de obra R\$	Material R\$	Perda por Lucro Cessante R\$
1	78,33	42,25	156,66	1.943,52	4.780,72
2	313,32	52,14	274,55	452,18	5.963,51
3	78,33	68,70	274,55	4.380,00	8.709,20