

CLEITON RODRIGUES DE SOUSA

Análise da Confiabilidade de Componentes Presentes em Material Rodante Ferroviário

Guaratinguetá - SP
2017

CLEITON RODRIGUES DE SOUSA

Análise da Confiabilidade de Componentes Presentes em Material Rodante Ferroviário

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula

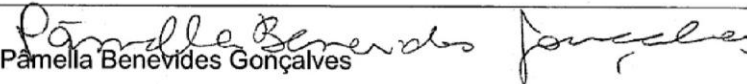
Guaratinguetá - SP
2017

S726a Sousa, Cleiton Rodrigues de
Análise da confiabilidade de componentes presentes em material rodante ferroviário / Cleiton Rodrigues de Sousa – Guaratinguetá, 2017.
94 f : il.
Bibliografia: f. 84-85

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula

1. Confiabilidade (Engenharia) 2. Engenharia ferroviária 3. Ferrovias - Equipamento e acessórios. I. Título

CDU 658.56


Pamela Benevides Gonçalves

Bibliotecária CRB/8: 9203

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE COMPONENTES PRESENTES EM
MATERIAL RODANTE FERROVIÁRIO**

CLEITON RODRIGUES DE SOUSA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO
DIPLOMA DE **GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Leonardo Mesquita
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. AGNELO MAROTTA CASSULA
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO LOTUFO
UNESP-FEG


Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
UNESP-FEG

DEZEMBRO de 2017

DADOS CURRICULARES

CLEITON RODRIGUES DE SOUSA

NASCIMENTO	08.04.1995 – São Paulo / SP
FILIAÇÃO	Manoel Rodrigues de Sousa Maria de Lourdes dos Santos Sousa
2011/2012	Curso Técnico em Automação Industrial Escola Técnica Estadual Takashi Morita
2010/2012	Ensino Médio Escola Técnica Estadual Takashi Morita

Dedico este trabalho, de modo especial, aos meus pais que incentivaram meus avanços nos estudos, sem eles nada teria sido possível.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, *Manoel e Lourdes*, por me fazerem tornar a pessoa que sou hoje e por todos os ensinamentos que me passaram.

Ao meu irmão *Daniel* pelas ajudas, críticas, discussões e dicas, elas foram muito importantes para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus amigos da República Masmorra que ao longo dos últimos 5 anos se tornaram uma segunda família para mim.

Aos meus colegas de trabalho *Alexandre, André, Diógenes, Guilherme e Roger* que me apresentaram à confiabilidade e à engenharia ferroviária, ensinando e incentivando o estudo dessas áreas. Além de terem ajudado e incentivado a execução desse trabalho.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula*, pelo auxílio, orientação e compreensão ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

A todos os professores que tive a oportunidade de conhecer ao longo da minha vida acadêmica e que contribuíram para o meu conhecimento.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

A Deus.

“Quem busca o conhecimento e o acha, obterá dois prêmios: um por procurá-lo, e outro por achá-lo. Se não o encontrar, ainda restará o primeiro prêmio. ”

Maomé

RESUMO

O estudo da confiabilidade é uma das atividades da engenharia mais requisitadas nos últimos anos, buscando tornar um produto ou processo de fabricação menos suscetível a falhas. Através de análises de predição ou estudos de campo ligados à confiabilidade é possível verificar qual a probabilidade de um produto ou processo falhar ao longo do tempo, sendo uma ferramenta de extrema importância para qualquer empresa que queira aumentar a segurança de seus produtos e a sua competitividade no mercado. O estudo da confiabilidade permite analisar o desempenho de um produto em operação ou fazer predições, gerando indicadores que possam ajudar a fazer projetos melhores de forma a atacar os pontos mais fracos verificados com mais atenção e cuidado. Além disso, quando aplicado a um processo fabril permite reduzir custos e aumentar a eficiência na produção. Com isso, o presente trabalho busca analisar a confiabilidade de componentes presentes em projetos de material rodante, sendo uma análise ligada ao produto desenvolvido e em operação comercial, no caso, uma frota de trens do sistema metroviário de São Paulo - SP. Para isso, foi desenvolvida uma ferramenta baseada nas normas internacionais IEC 61649 (2008) e IEC 60605-4 (2001), que apresentam metodologias para a análise da confiabilidade de componentes através de dados de campos, utilizando a análise de Weibull e intervalos de confiança.

PALAVRAS-CHAVE: Confiabilidade. Componentes Ferroviários. Material Rodante. Engenharia Ferroviária.

ABSTRACT

The study of reliability is one of the most requested engineering activities in recent years, seeking to make a product or manufacturing process less susceptible to failure. Through prediction analysis or reliability-related field studies, it is possible to verify the probability of a product or process failing over time, being a tool of extreme importance for any company that wants to increase the safety of its products and its competitiveness in the Marketplace. The reliability studies allows analyzing the performance of a product in operation or making predictions, generating indicators that can help to make better projects in order to attack the weakest points verified with more attention and care. In addition, when applied to a manufacturing process, it can reduce costs and increase production efficiency. With this, the present work seeks to analyze the reliability of components present in rolling stock projects, being an analysis linked to the product developed and in commercial operation, in this case, a fleet of trains of the subway system of São Paulo - SP. For this, a tool was developed based on the international standards IEC 61649 (2008) and IEC 60605-4 (2001), which present methodologies for the analysis of the reliability of components through field data, using the Weibull analysis and confidence intervals.

KEYWORDS: Reliability. Railway Components. Rolling Stock. Railway Engineering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - A Confiabilidade e seus Pilares	17
Figura 2 - Hierarquia entre Sistema, Subsistemas e Componentes	18
Figura 3 - Trem de Passageiros em Operação Comercial	20
Figura 4 - Tram em Operação Comercial	20
Figura 5 - Curva da Banheira	26
Figura 6 - Ciclo de Vida de um Item do Ponto de Vista Médio	28
Figura 7 - Exemplo do Ciclo de Vida Real de um Item	30
Figura 8 - Exemplo de uma Função Densidade de Falhas de uma Distribuição Normal	32
Figura 9 - Exemplo de uma Função Acumulada de Falhas de uma Distribuição Normal	33
Figura 10 - Exemplo de uma Função Densidade de Falhas de uma Distribuição Normal com $F(x)$ e $R(x)$	35
Figura 11 - Função Densidade de Falhas da Distribuição de Weibull	40
Figura 12 - Função Acumulada de Falhas da Distribuição de Weibull	41
Figura 13 - Função da Taxa de Falha da Distribuição de Weibull	42
Figura 14 - Intervalo de Confiança para 10 Amostras Diferentes com $(1 - \alpha) = 90\%$	46
Figura 15 - Gráfico com a Regressão Linear para os Pontos Gerados pelas Falhas	52
Figura 16 - Aba “Entrada Informações” da FACC	59
Figura 17 - Aba “Entrada Quilometragem” da FACC	60
Figura 18 - Aba “Entrada Falhas” da FACC (1)	62
Figura 19 - Aba “Entrada Falhas” da FACC (2)	62
Figura 20 - Aba “Cálculo” da FACC	64
Figura 21 - Aba “Resultados” da FACC	64
Figura 22 - Unidade da Frota (TUE 214) com os Componentes Analisados	66
Figura 23 - Gráfico da Regressão Linear para os Faróis com <i>Outlier</i>	68
Figura 24 - Gráfico da Regressão Linear para os Faróis sem <i>Outliers</i>	68
Figura 25 - Gráfico da Função Densidade de Falhas para os Faróis	69
Figura 26 - Gráfico da Função Acumulada de Falhas para os Faróis	70
Figura 27 - Gráfico da Função Confiabilidade para os Faróis	70
Figura 28 - Gráfico da Função de Taxa de Falha para os Faróis	70
Figura 29 - Gráfico da Regressão Linear para as Palhetas	74
Figura 30 - Gráfico da Função Densidade de Falhas para as Palhetas	75

Figura 31 - Gráfico da Função Acumulada de Falhas para as Palhetas	75
Figura 32 - Gráfico da Função Confiabilidade para as Palhetas	76
Figura 33 - Gráfico da Função de Taxa de Falha para as Palhetas.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comportamento da Função de Taxa de Falha em Função de β	39
Tabela 2 - Interpretações Físicas Sobre os Parâmetros da Função de Weibull	43
Tabela 3 - Relação dos Métodos ou Tipos de Dados com o Método Gráfico	48
Tabela 4 - Exemplo de Tabela Utilizada para o Levantamento de β e η	51
Tabela 5 - Total de Horas que Cada Trem Operou para o Período de Observação.....	72
Tabela 6 - Total de Quilômetros que Cada Trem Rodou para o Período de Observação	77
Tabela 7 - Intervalo de Confiança para os Ejetores com a Análise no Tempo.....	79
Tabela 8 - Intervalo de Confiança para os Ejetores com a Análise na Distância Percorrida ...	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FACC	Ferramenta de Análise da Confiabilidade de Componentes
FDA	Função Distribuição Acumulada
FDP	Função Densidade de Probabilidade
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
MDBF	<i>Mean Distance Between Failures</i>
MDTF	<i>Mean Distance to Failure</i>
MRR	<i>Median Rank Regression</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i>
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

λ_x	taxa de falha por unidade da variável x
n	número de ocorrências de falhas durante o período de observação
X_{on}	quantidade total de x que o item esteve em operação no período de observação
λ_t	taxa de falha no tempo
T_{on}	quantidade total de tempo que o item esteve em operação no período de observação
j	quantidade de itens observados
n_j	número de ocorrências falhas no item j durante o período de observação
$X_{on\ j}$	quantidade total de x que o item j esteve em operação no período de observação
T_{off}	quantidade total de tempo que o item esteve fora de operação, para reparos, no período de observação
μ	taxa de reparo
$t_{on\ i}$	tempo que o item esteve em operação até a ocorrência da falha i
$t_{off\ i}$	tempo que o item esteve fora de operação, para reparos, após a ocorrência da falha i
$h(x)$	função de taxa de falha da variável aleatória x
$f(x)$	função densidade de falhas da variável aleatória x
$F(x)$	função acumulada de falhas da variável aleatória x
$R(x)$	função confiabilidade da variável aleatória x
x_0	vida inicial do item
β	parâmetro de forma da distribuição de Weibull
η	parâmetro de escala da distribuição de Weibull
Γ	função gama
α	nível de significância
i	classificação da falha
F_i	percentual acumulado de falhas para a falha i
A	coeficiente angular da reta gerada pela regressão linear
B	coeficiente linear da reta gerada pela regressão linear
R^2	coeficiente de determinação
X^*	acumulado de x durante o teste
φ	graus de liberdade
$\chi^2_{\alpha/2}(\varphi)$	distribuição qui-quadrado para $\alpha/2$ com φ graus de liberdade
$\chi^2_{1-\alpha/2}(\varphi)$	distribuição qui-quadrado para $1-\alpha/2$ com φ graus de liberdade
λ_{xICS}	limite inferior do intervalo de confiança bilateral da taxa de falha, para a variável x , em testes com substituição de itens
λ_{xSCS}	limite superior do intervalo de confiança bilateral da taxa de falha, para a variável x , em testes com substituição de itens

$MTTF_{IC}$	intervalo de confiança bilateral do MTTF
$MDTF_{IC}$	intervalo de confiança bilateral do MDTF
$\lambda_{x_{ISS}}$	limite inferior do intervalo de confiança bilateral da taxa de falha, para a variável x , em testes sem substituição de itens
$\lambda_{x_{SSS}}$	limite superior do intervalo de confiança bilateral da taxa de falha, para a variável x , em testes sem substituição de itens
λ_d	taxa de falha para a distância percorrida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONCEITOS DE CONFIABILIDADE	16
1.2	DEFINIÇÃO DE ITENS REPARÁVEIS E ITENS NÃO-REPARÁVEIS	18
1.3	A IMPORTÂNCIA DA CONFIABILIDADE NO MERCADO FERROVIÁRIO	19
1.4	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	22
2	PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE	23
2.1	TAXA DE FALHA	24
2.2	ÍNDICES DE MÉDIA APLICADOS À CONFIABILIDADE	27
2.3	FUNÇÃO DENSIDADE DE FALHAS	31
2.4	FUNÇÃO ACUMULADA DE FALHAS	32
2.5	FUNÇÃO CONFIABILIDADE	34
2.6	DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	36
2.7	INTERVALO DE CONFIANÇA	44
3	METODOLOGIAS UTILIZADAS NAS ANÁLISES	47
3.1	LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	47
3.2	LEVANTAMENTO DO INTERVALO DE CONFIANÇA PARA λ E MTTF/MDTF	53
4	CARACTERÍSTICAS DA FERRAMENTA DESENVOLVIDA	58
4.1	VISÃO INICIAL DA FERRAMENTA E SUA UTILIZAÇÃO	58
5	RESULTADOS OBTIDOS COM A FERRAMENTA DESENVOLVIDA	66
5.1	ANÁLISE DOS FARÓIS FRONTAIS DOS CARROS-CABINE	67
5.2	ANÁLISE DAS PALHETAS DOS PARA-BRISAS	74
5.3	ANÁLISE DOS EJETORES DE ÁGUA DOS PARA-BRISAS	78
6	CONCLUSÃO	82
	REFERÊNCIAS	83
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	84
	APÊNDICE A - Distribuição Qui-Quadrado	85
	ANEXO A - Lista de Falhas dos Faróis Frontais dos Carros-Cabine	87
	ANEXO B - Lista de Falhas das Palhetas dos Para-Brisas	91
	ANEXO C - Lista de Falhas dos Ejetores de Água dos Para-Brisas	92

1 INTRODUÇÃO

O trabalho aqui apresentado tem como base o estudo da confiabilidade, uma ciência complexa, porém poderosa em qualquer âmbito da engenharia, que apesar da sua importância ainda não é muito aplicada no Brasil. Serão apresentados os principais conceitos, metodologias e aplicabilidades da confiabilidade, além dos resultados de estudos realizados pelo autor com base em dados de campo obtidos através de projetos de trens de uma empresa do setor ferroviário.

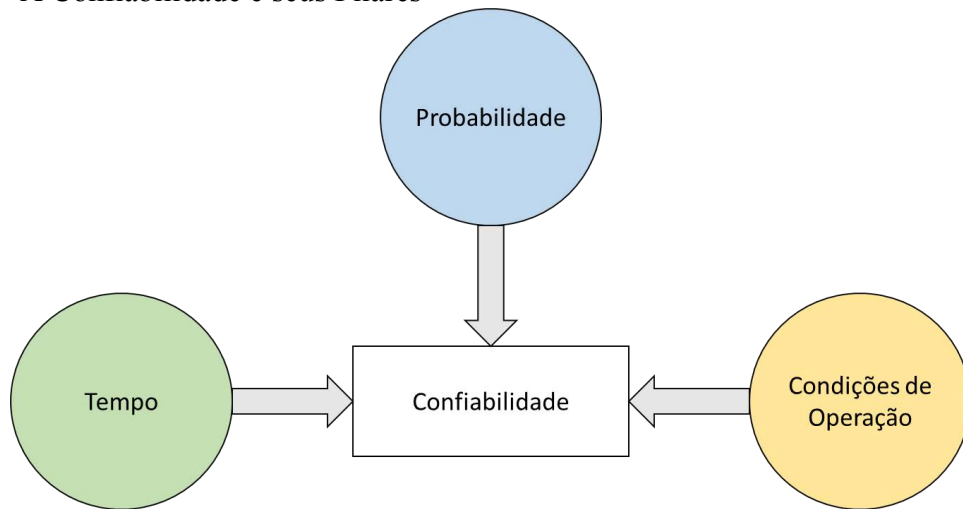
1.1 CONCEITOS DE CONFIABILIDADE

A confiabilidade pode ser definida como a “Probabilidade de que um componente, equipamento ou sistema exercerá sua função sem falhas, por um período de tempo previsto, sob condições de operação especificadas” (LAFRAIA, 2001, p.11). Ou então como “A probabilidade de um item executar uma função requerida sem falha em condições determinadas por um período de tempo determinado” (O’CONNOR; KLEYNER, 2012, p.1, tradução nossa). Pode ser entendida também pela definição a seguir: “Confiabilidade de um sistema é a probabilidade de que, quando em operação sob condições ambientais estabelecidas, o sistema apresentará uma performance desejada (sem falhas) para um intervalo de tempo especificado” (PIAZZA, 2000, p.14)

Quando se lê confiabilidade, imediatamente se pensa na palavra confiança, e de certa forma a confiabilidade nada mais é do que a ciência que busca estudar o nível de confiança que se pode ter em um produto ou processo. Quando um produto ou processo é confiável significa que se o mesmo estiver sendo usado de forma correta e nos ambientes para o qual foi projetado, espera-se que ele não apresentará falhas, de forma que caso se verifique uma falha ela seja ao acaso. Entretanto, é natural que com o envelhecimento essa confiança vá se perdendo, porque espera-se que esse produto ou processo possa vir a falhar.

O raciocínio anterior e as definições de confiabilidade apresentadas dizem muito sobre essa ciência, de forma que o estudo da confiabilidade é baseado em três pontos chaves: probabilidade, tempo e condições de operação, sendo que as duas primeiras ideias estão ligadas a algo quantitativo e a última a algo qualitativo. A Figura 1 mostra essa relação entre a confiabilidade e seus pilares.

Figura 1 - A Confiabilidade e seus Pilares



Fonte: produção do próprio autor

Quando se espera que em determinado período de tempo o produto ou o processo não venha a falhar é que, na realidade, a sua probabilidade de falha é pequena. Entretanto, com o passar do tempo ocorre o envelhecimento e essa probabilidade de falha aumenta. Mas, se esse mesmo produto ou processo estiver sendo usado de forma incorreta ou em um ambiente não favorável, essa probabilidade de falha pode vir a aumentar e o nível de confiança que se poderia ter já não vale mais para essa situação, ou seja, a confiabilidade é extremamente dependente das condições de operação.

A confiabilidade tem uma relação muito forte com outras ciências, sendo dependente de conceitos, metodologias e aplicações de diferentes áreas, além de contribuir de diferentes formas com a engenharia em geral. Não se pode pensar na confiabilidade como um estudo isolado que depende apenas de conhecimentos específicos e que gera resultados sem muitas interfaces e impactos.

Vale ressaltar que o estudo da confiabilidade exige um conhecimento profundo do produto ou processo que se analisa. Logo, só é possível obter resultados confiáveis sobre determinado estudo quando a análise não se limita a apenas cálculos e metodologias comuns na confiabilidade, mas quando se insere a análise qualitativa daquilo que se está tratando, avaliando como e porque podem ocorrer falhas.

A confiabilidade é uma ciência poderosa e nos dias de hoje não se pode pensar na engenharia como um todo sem os conhecimentos que ela pode proporcionar. Entre os estudos mais importantes para qualquer operação de um produto ou processo pode-se citar a disponibilidade, a manutenibilidade e a segurança, sendo que a confiabilidade está intimamente ligada a cada um desses estudos.

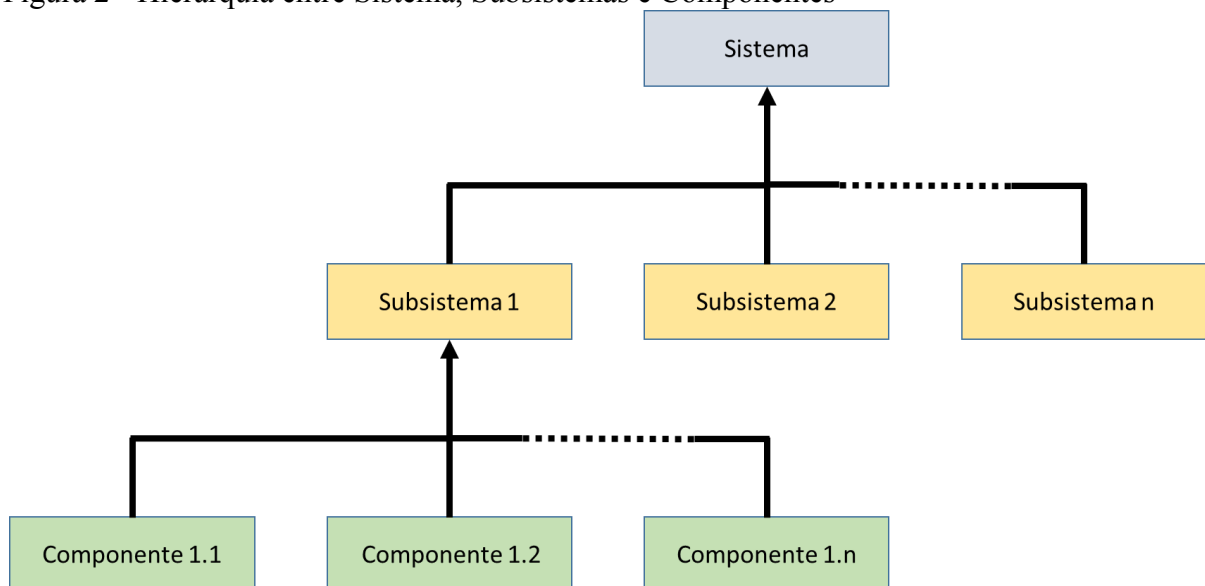
1.2 DEFINIÇÃO DE ITENS REPARÁVEIS E ITENS NÃO-REPARÁVEIS

Nesse trabalho será comum o uso das definições de reparável ou não-reparável. Mas antes de entender o que cada uma dessas definições sugere, é preciso saber qual a diferença entre item, componente e sistema. Através de Lafraia (2001), pode-se definir que:

- Item é um termo geral que pode designar qualquer parte, subsistema, sistema ou equipamento que possa ser considerado individualmente e ensaiado separadamente;
- Componente é um item que desempenha uma ou mais funções específicas, podendo falhar somente uma vez;
- Um sistema é a união de vários itens que trabalham em conjunto, com cada um desses itens executando determinada função que juntas geram um trabalho principal.

Logo, pode-se entender que um sistema completo contém subsistemas que por sua vez contém componentes. Se analisado do ponto de vista do subsistema, pode-se entender que esse subsistema na verdade é um sistema composto por vários componentes. A Figura 2 mostra um diagrama com a hierarquia entre sistema, subsistemas e componentes:

Figura 2 - Hierarquia entre Sistema, Subsistemas e Componentes



Fonte: produção do próprio autor

Quando se fala em itens não-reparáveis entende-se que é todo e qualquer item que não tolera nenhuma falha, ou seja, na ocorrência de uma falha a única solução é a substituição desse item por um novo, segundo Lafraia (2001). O componente é considerado um item não-reparável justamente por não tolerar falhas, não havendo forma de repará-lo.

Já quando se fala em itens reparáveis entende-se que é todo e qualquer item que quando falha pode ser colocado de volta ao serviço em plenas condições de funcionamento por meio de reparos, segundo Lafraia (2001). O sistema ou subsistema são casos típicos de itens reparáveis, já que quando falham podem ser reparados por meio da substituição do(s) componente(s) em estado de falha.

1.3 A IMPORTÂNCIA DA CONFIABILIDADE NO MERCADO FERROVIÁRIO

A confiabilidade é um ponto muito importante no mercado ferroviário, sendo usado como parâmetro para o acompanhamento da qualidade dos produtos entregues aos operadores de linhas férreas.

No mercado ferroviário, mais especificamente no de transporte de passageiros, tanto o operador (cliente) quanto o fornecedor do material rodante acompanham a geração de previsões, na fase de projeto e desenvolvimento do produto, e indicadores de confiabilidade quando a frota entra em operação comercial. Pode-se entender material rodante como todo e qualquer veículo que se locomove sobre uma via permanente, por exemplo, para o transporte de passageiros existem os trens e os trams (conhecidos no Brasil como veículos leves sobre trilhos) que se encaixam nessa categoria. As Figuras 3 e 4 mostram exemplos de um trem de passageiros e de um tram em operação comercial, respectivamente.

Figura 3 - Trem de Passageiros em Operação Comercial



Fonte: Railway Pro (2017)

Figura 4 - Tram em Operação Comercial



Fonte: Porto Maravilha (2017)

A grande parte dos operadores de linhas de passageiros quando tem a intenção de renovar ou reformar a sua frota de material rodante lançam licitações com especificações técnicas. Essas especificações tem o objetivo de avaliar se o fornecedor do material rodante está em conformidade com as principais características exigidas pelo operador. Os modelos dessas especificações técnicas variam bastante para cada projeto, já que uma particularidade

importante desse mercado é que cada cliente tem um conjunto de características único, que varia para cada operador, exigindo do fabricante um nível de *expertise* alto na área de projetos, fabricação, qualidade e engenharia em geral.

Apesar da grande variabilidade das especificações técnicas de material rodante, elas costumam apresentar uma seção dedicada à confiabilidade, no qual apresenta metas contratuais em que o fornecedor deve se comprometer a atender para poder concorrer a licitação. Uma vez que determinado fornecedor ganha uma licitação, ele deve atender essas metas quando o trem entra em operação, estando sujeito a penalidades milionárias caso não atenda. O contrato entre o fabricante e o cliente costuma determinar um período de tempo que o fornecedor deve acompanhar e demonstrar a confiabilidade de seu produto para o cliente.

Consequentemente, o fabricante deve ter meios de poder avaliar a confiabilidade dos diferentes sistemas que compõem um trem durante o período:

- Em que vai concorrer a um projeto, para que se possa avaliar o risco contratual do mesmo;
- De execução do projeto, para que se garanta os procedimentos corretos, de forma a eliminar os principais gargalos que afetam a confiabilidade de seu produto;
- Em que o seu produto entra em operação comercial, para que se possa avaliar a confiabilidade daquilo que foi entregue ao cliente, garantindo que as metas propostas no início do projeto sejam cumpridas.

Todas as características apresentadas anteriormente abrem um nicho de mercado para a confiabilidade muito importante no setor ferroviário, exigindo a formação de especialistas e ferramentas capazes de atender esse cenário.

É nesse ambiente que o presente trabalho se insere, buscando avaliar a confiabilidade de componentes individuais instalados em projetos em operação comercial realizados por uma empresa que é uma das líderes mundiais na fabricação de material rodante para o transporte de passageiros. Todas as avaliações que serão apresentadas foram feitas através de uma ferramenta desenvolvida pelo autor (apresentada no capítulo 4) que se apoiou nos conceitos e metodologias que serão apresentadas nas seções seguintes.

1.4 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

A monografia apresenta 6 seções primárias, sendo que o capítulo 1 apresenta o que é confiabilidade e a sua importância para o mercado ferroviário, além de fazer uma discussão sobre o conceito de itens-reparáveis e não-reparáveis. O capítulo 2 mostra os principais parâmetros de confiabilidade e a forte relação entre a confiabilidade e a estatística. O capítulo 3 apresenta as metodologias utilizadas no desenvolvimento de uma ferramenta para a avaliação da confiabilidade de componentes ferroviários, sendo que os métodos foram baseados nas normas internacionais IEC 61649 (2008) e IEC 60605-4 (2001). O capítulo 4 discute essa ferramenta desenvolvida, mostrando como ela é utilizada. O capítulo 5 discute a confiabilidade de três componentes (faróis frontais dos carros-cabine, palhetas dos para-brisas e ejetores de água dos para-brisas) de uma frota de trens do sistema metroviário de São Paulo - SP, através da ferramenta desenvolvida e apresentada no capítulo 4, mostrando os resultados obtidos a partir de dados de campo sobre a operação dessa frota. O capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas com o trabalho.

2 PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE

Assim como apresentado na seção 1.1, a confiabilidade é uma ciência que estuda um produto ou processo de forma qualitativa e quantitativa. De modo a quantificar a confiabilidade surgiram parâmetros que buscam permitir a comparação entre diferentes itens, podendo ter características similares ou não. Esses parâmetros tem uma relação muito forte com a estatística, sendo ela uma das bases nas quais a confiabilidade se apoia.

Os principais parâmetros de confiabilidade na qual esse trabalho faz uso são:

- Taxa de Falha;
- *Mean Time to Failure* (MTTF), termo em inglês que significa Tempo Médio até a Falha;
- *Mean Time Between Failures* (MTBF), termo em inglês que significa Tempo Médio entre Falhas;
- Função Densidade de Falhas;
- Função Acumulada de Falhas;
- Função Confiabilidade.

Entre os principais elementos ligados à estatística, na qual esse trabalho se apoia, pode-se citar:

- Distribuição de Weibull;
- Função Densidade de Probabilidade (FDP);
- Função Distribuição Acumulada (FDA);
- Intervalo de Confiança.

O presente trabalho utiliza esses parâmetros e elementos para fazer uma análise sobre a confiabilidade de componentes utilizados em sistemas ferroviários, mais especificamente de sistemas e componentes de trens em operação comercial. As seções seguintes apresentam com mais detalhes cada um dos parâmetros e técnicas anteriores.

2.1 TAXA DE FALHA

A Taxa de Falha é um dos principais parâmetros para avaliar a confiabilidade de um produto ou processo, ela representa a quantidade de falhas que ocorrem em um determinado item por determinada variável x , podendo x ser tempo, distância, ciclos, entre outros. A taxa de falha pode ser representada em falhas por hora, falhas por milhão de horas, falhas por quilômetro, falhas por milhão de quilômetros, falhas por ciclo de operação, ou seja, pode ser representada na variável mais conveniente com a análise ou operação do item em questão. Matematicamente, a taxa de falha pode ser representada pelas equações (1) e (2), quando apenas um único item é observado.

$$\lambda_x = \frac{n}{X_{on}} \quad (1)$$

Em que:

- λ_x é taxa de falha por unidade da variável x ;
- n é o número de ocorrências de falhas durante o período de observação;
- X_{on} é a quantidade total de x que o item esteve em operação no período de observação.

Quando a variável x é o tempo a equação (1) fica:

$$\lambda_t = \frac{n}{T_{on}} \quad (2)$$

Em que:

- λ_t é taxa de falha no tempo;
- n é o número de ocorrências de falhas durante o período de observação;
- T_{on} é a quantidade total de tempo que o item esteve em operação no período de observação.

Quando mais de um item do mesmo tipo é observado, a taxa de falha pode ser calculada pela equação (3):

$$\lambda_x = \frac{\sum_{j=1}^j (n_j)}{\sum_{j=1}^j (X_{on_j})} \quad (3)$$

Em que:

- λ_x é taxa de falha por unidade da variável x ;
- j é a quantidade de itens observados;
- n_j é o número de ocorrências falhas no item j durante o período de observação;
- X_{on_j} é a quantidade total de x que o item j esteve em operação no período de observação.

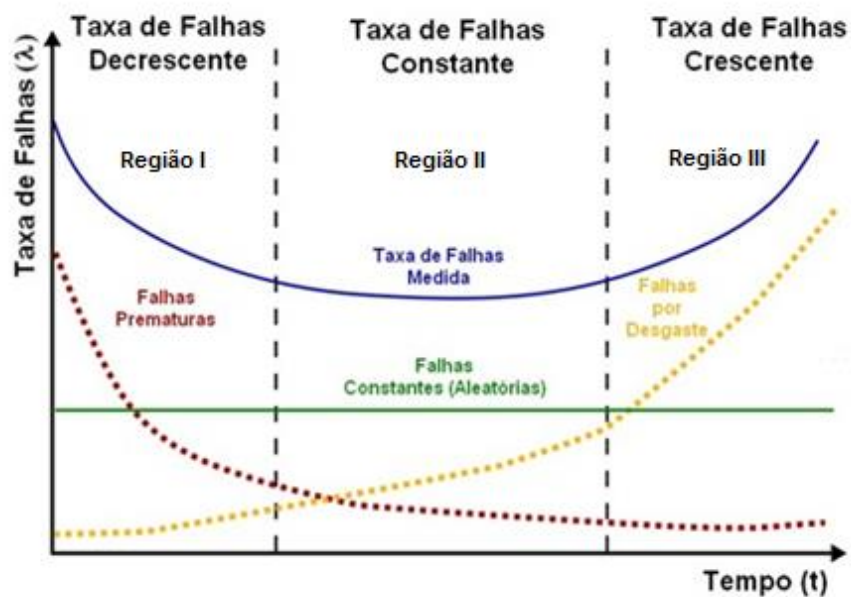
Apesar de ser comumente apresentada como um número absoluto, a taxa de falha de um item é uma função que varia ao longo da variável x . Para as situações em que a unidade dessa variável é o tempo ela pode ser representada por $h(t)$, é comum também a função da taxa de falha ser chamada de função de risco. O que acontece é que se considera a função de taxa de falha com um comportamento constante na maior parte dos casos e então ela é dada como um número absoluto, de forma que o item está na fase do período de vida útil (região II da Figura 5).

As equações (1), (2) e (3) apresentadas anteriormente têm um caráter constante e só podem ser usadas quando o comportamento característico do item em análise é de uma distribuição exponencial de probabilidade de falha, em que as falhas têm um caráter aleatório e, portanto, sua taxa de falha se apresenta constante. Nesse trabalho é analisado tanto a taxa de falha em função do tempo como em função da distância, medido em quilômetros, chamado aqui de $h(d)$.

O que faz a taxa de falha ser uma função é o fato de existir diferentes tipos de falhas que ocorrem no item analisado, pode-se agrupar as falhas em três tipos genéricos: falhas prematuras, falhas aleatórias e falhas por desgaste.

Para cada um dos três tipos de falhas a função da taxa de falha apresenta um comportamento diferente, variando a característica desse comportamento de item para item. Quando o item analisado é um componente individual, a função da taxa de falha para o ciclo de vida do componente costuma apresentar uma forma bem característica, chamada de curva da banheira, como pode ser vista na Figura 5:

Figura 5 - Curva da Banheira



Fonte: Natário (2011).

No início da vida o componente apresenta uma taxa de falha decrescente (região I da Figura 5), segundo Lafraia (2001) esse tipo de característica está ligado a erros na fabricação, na programação de softwares, na instalação, entre outros, com o tempo espera-se que esses erros sejam corrigidos e consequentemente a taxa de falha vai baixando, essa característica é representada pela linha pontilhada vermelha na Figura 5. Esse período inicial da vida do componente costuma ser chamado de mortalidade infantil.

Após a mortalidade infantil o componente entra em uma fase onde as falhas ocorrem de forma aleatória, nessa fase a distribuição de probabilidade de falha ao longo do tempo do item é do tipo exponencial, apresentando uma taxa de falha constante (região II Figura 5), essa característica é representada pela linha contínua verde nessa mesma figura. Segundo Lafraia (2001), as falhas nesse período costumam ser difíceis de evitar, entre elas pode-se citar, por exemplo, aquelas causadas por fenômenos naturais imprevisíveis ou por uso indevido do

equipamento que conseqüentemente degrada seus componentes. Essa fase é comumente chamada de vida útil do componente, ou seja, a parte em que ele é efetivamente utilizado.

Por fim, segundo Lafaia (2001), o componente entra em uma fase onde começam a aparecer falhas por desgaste, como fadiga, corrosão, degradação da resistência, envelhecimento, entre outros. Com isso a taxa de falha apresenta uma característica crescente (região III Figura 5) e sinaliza que o componente está na sua fase final de vida, essa característica é representada pela linha pontilhada amarela na Figura 5. Essa fase é comumente chamada de período de desgaste.

A união dos três períodos de vida do componente, apresentadas anteriormente, forma a curva da banheira, representada pela linha contínua azul na Figura 5, e mostra de forma clara como a taxa de falha se comporta ao longo do tempo para um componente nas diferentes fases de sua vida.

Vale ressaltar que a curva da banheira só se aplica a componentes individuais. Em um sistema (item que contém vários componentes trabalhando em conjunto, como discutido na seção 1.2) o que acontece é que há a sobreposição de diferentes curvas da banheira, uma para cada componente que o compõem, sendo que cada um desses componentes apresenta períodos diferentes em que a taxa de falha se apresenta constante. Então, o sistema como um todo costuma estar no período normal, no qual apresenta falhas aleatórias, e conseqüentemente não entra em um período de desgaste bem definido, como apresentado em Lafaia (2001), devido ao fato do período de desgaste de cada item que o compõem começar em épocas diferentes.

2.2 ÍNDICES DE MÉDIA APLICADOS À CONFIABILIDADE

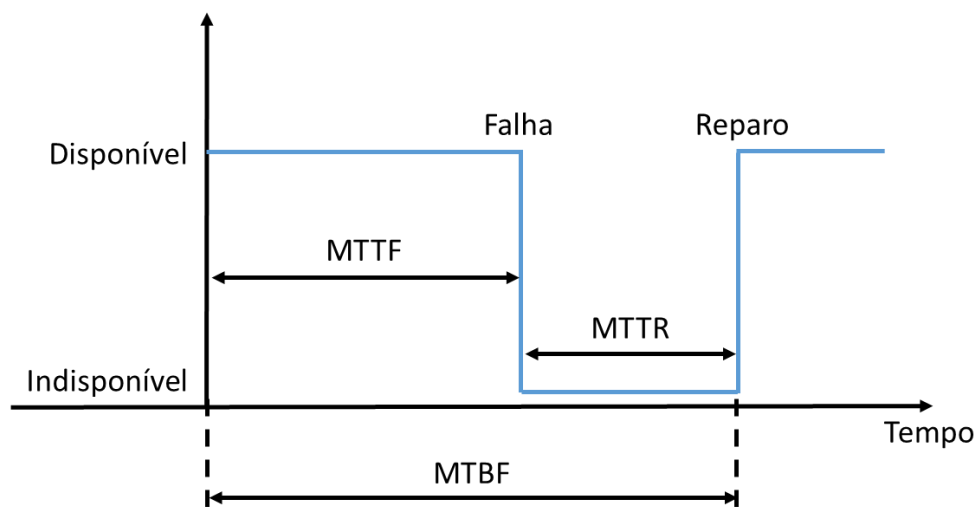
O uso da média é muito comum na confiabilidade, sendo que alguns índices são meramente médias de certos valores observados durante o ciclo de vida de determinado item. Nesse capítulo será apresentado alguns desses índices, entre eles o MTTF, MTTR, MTBF, MDTF e o MDBF.

O MTTF, sigla em inglês para *Mean Time to Failure* que significa Tempo Médio até a Falha, é um importante índice aplicado aos componentes de um sistema, vale frisar que o MTTF é utilizado apenas itens não-reparáveis, segundo O'Connor; Kleyner (2012) e Piazza (2000), porque falham apenas uma vez e devem ser substituídos. Como o próprio nome diz, MTTF é o tempo que um componente leva, em média, para falhar após o seu início de operação.

Já o MTBF, sigla em inglês para *Mean Time Between Failures* que significa Tempo Médio Entre Falhas, ele expressa o tempo médio entre uma falha e outra para um determinado

item. Para entender o MTBF é importante ter em mente um outro índice que está ligado aos estudos de manutenibilidade, o MTTR, ou *Mean Time to Repair* que significa Tempo Médio Para Reparo. O MTTR é o tempo médio entre uma falha e a volta do item para o serviço, ou seja, o tempo em que o item ficou fora de operação para reparo. A Figura 6 mostra o ciclo de vida de um item e ilustra como o MTBF, MTTF e MTTR estão presentes nesse ciclo, de forma que o limite inferior do gráfico representa que o item não está apto a realizar sua função (está em estado de falha) e no limite superior o item está em operação normal.

Figura 6 - Ciclo de Vida de um Item do Ponto de Vista Médio



Fonte: produção do próprio autor

Matematicamente, o MTTF, MTTR e o MTBF podem ser expressos através das equações (4), (5) e (6), respectivamente, quando o item em análise apresenta características de uma distribuição exponencial:

$$MTTF = \frac{T_{on}}{n} = \frac{1}{\lambda_t} \quad (4)$$

$$MTTR = \frac{T_{off}}{n} = \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

$$MTBF = \frac{T_{on} + T_{off}}{n} \quad (6)$$

Em que:

- MTTF é o Tempo Médio até a Falha;
- MTTR é o Tempo Médio Para Reparo;
- MTBF é o Tempo Médio entre Falhas;
- T_{on} é a quantidade total de tempo que o item esteve em operação no período de observação;
- T_{off} é a quantidade total de tempo que o item esteve fora de operação, para reparos, no período de observação;
- n é o número de ocorrências de falhas durante período de observação;
- λ_t é a taxa de falha no tempo;
- μ é a taxa de reparo.

O μ é um índice análogo ao λ_t que é utilizado para descrever a manutenibilidade de um determinado item, sendo o inverso do MTTR, quando assume-se que a distribuição de tempos de reparo desse item segue um modelo exponencial.

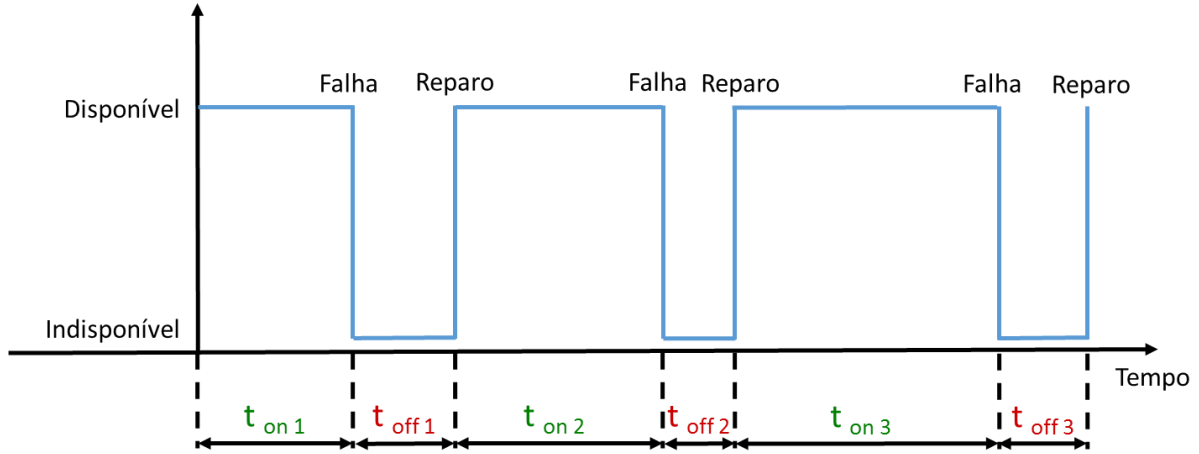
O MTTF e o MTTR podem ser obtidos através do λ_t e do μ quando se considera um modelo de distribuição exponencial, conforme as equações (4) e (5), respectivamente, porque a média de uma distribuição exponencial é o inverso de λ , segundo Martins (2001), sendo que o λ é um parâmetro único no qual descreve a distribuição exponencial. Adotando-se um modelo exponencial para descrever a probabilidade de falha, λ é a própria taxa de falha no tempo (λ_t), quando está se analisando em função do tempo. O mesmo vale para a distribuição de tempos de reparo, só que dessa vez o λ é a própria taxa de reparo (μ).

Na prática o MTTR tem um valor muito menor que o MTBF, ou seja, $T_{off} \ll T_{on}$. Portanto, o MTBF pode ser calculado através da equação (7) sem muitos prejuízos no resultado:

$$MTBF \cong MTTF = \frac{T_{on}}{n} = \frac{1}{\lambda_t} \quad (7)$$

As equações (4), (5), (6) e (7) podem ser expandidas para se utilizar em mais de um item, se eles forem do mesmo tipo, assim como foi feito na seção 2.1 através da equação (3).

Figura 7 - Exemplo do Ciclo de Vida Real de um Item



Fonte: produção do próprio autor

Para o exemplo da Figura 7, $T_{on} = t_{on1} + t_{on2} + t_{on3}$, $T_{off} = t_{off1} + t_{off2} + t_{off3}$ e $n = 3$.

Portanto, utilizando as equações (4) e (5) o resultado para o MTTF e para o MTTR desse item é:

$$MTTF = \frac{t_{on1} + t_{on2} + t_{on3}}{3} \quad (8)$$

$$MTTR = \frac{t_{off1} + t_{off2} + t_{off3}}{3} \quad (9)$$

$$MTBF = \frac{t_{on1} + t_{on2} + t_{on3} + t_{off1} + t_{off2} + t_{off3}}{3} \quad (10)$$

Em que:

- t_{on_i} é o tempo que o item esteve em operação até a ocorrência da falha i ;
- t_{off_i} é o tempo que o item esteve fora de operação, para reparos, após a ocorrência da falha i ;

Como a taxa de falha é uma função, como discutido na seção 2.1, pode-se chegar a conclusão errada que o MTBF ou o MTTF podem ser funções, quando se observa as equações (4) e (7). Porém, deve-se deixar claro que a equação (7) considera a taxa de falha como constante, ou seja, como um número absoluto expresso por λ_t e por isso ela não varia com o tempo. O próprio conceito de MTBF e de MTTF está ligado a médias e consequentemente não faz sentido serem expressos como funções propensas a variações, portanto, o MTBF e o MTTF são números absolutos assim como o MTTR.

Existem algumas variações do MTTF e MTBF que conceitualmente representam as mesmas ideias, mas de formas diferentes, entre elas existem o *Mean Distance Between Failures* (MDBF), ou Distância Média entre Falhas, em português; e o *Mean Distance to Failure* (MDTF), ou Distância Média até a Falha, em português.

2.3 FUNÇÃO DENSIDADE DE FALHAS

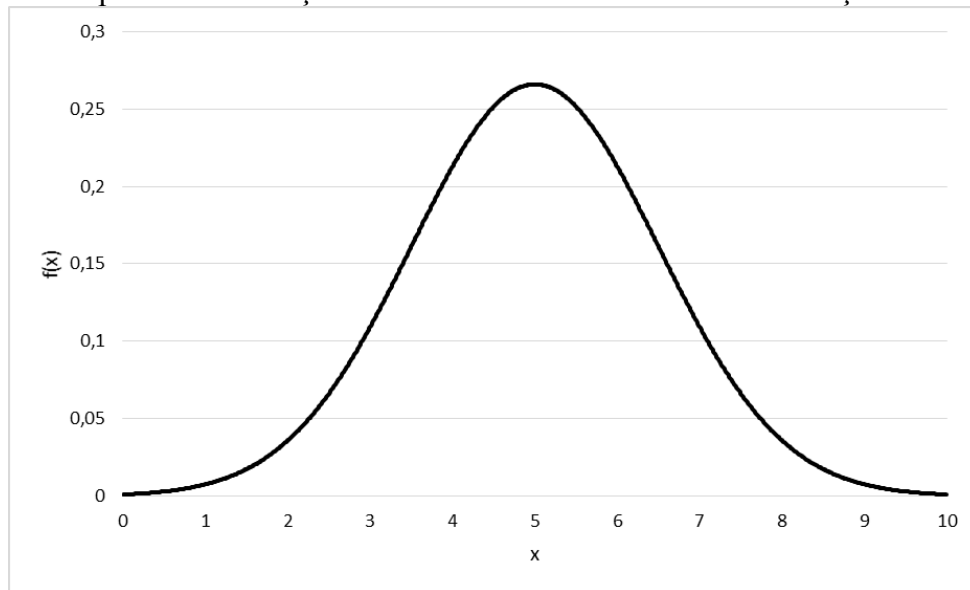
A função densidade de falhas é uma importante função para avaliar o comportamento das falhas de um item, através de Lafraia (2001), pode-se defini-la como a variação da probabilidade de falha ao longo da variável aleatória x , podendo x ser o tempo, distância, ciclos, entre outros. A simbologia utilizada para representar a função densidade de falhas é $f(x)$ e que pode ser interpretado como uma FDP (Função Densidade de Probabilidade) onde a variável aleatória é o x .

Essa função é representada por diferentes FDPs de diferentes tipos de distribuições de probabilidades que dependem das características do item analisado, devendo ser necessariamente distribuições contínuas.

Pelo fato da função densidade de falhas ser representada por uma FDP de determinada distribuição pode-se calcular a probabilidade de falha do item em análise para um intervalo entre x_1 e x_2 , através da área abaixo da curva de $f(x)$ para esse intervalo, como será discutido na seção 2.4.

Entre as principais distribuições contínuas aplicadas ao estudo da confiabilidade pode-se citar a Normal (Gaussiana), Log-Normal, Exponencial e a de Weibull, sendo essa última explicada com mais detalhes na seção 2.5, devido a sua importância para esse trabalho.

Figura 8 - Exemplo de uma Função Densidade de Falhas de uma Distribuição Normal



Fonte: produção do próprio autor

O gráfico da Figura 8 mostra um exemplo de função densidade de falhas de uma distribuição normal, nele é possível verificar a variação de $f(x)$ ao longo da variável x , no intervalo de $x = 0$ até $x = 10$.

A função densidade de falhas representa uma variação de probabilidade de falha por unidade de x , portanto, a condição $0 \leq f(x) \leq 1$ é obrigatória e qualquer resultado de $f(x)$ fora desse intervalo não é válido.

2.4 FUNÇÃO ACUMULADA DE FALHAS

A função acumulada de falhas desempenha papel muito importante no estudo da confiabilidade, através de Lfraia (2001), pode-se defini-la como a probabilidade de falha em determinado item no intervalo entre x_1 e x_2 de análise, sendo representado por $F(x)$.

Por exemplo, se uma análise de uma população de itens é feita para um intervalo de x_1 a x_2 obtendo um resultado de $F(x) = 0,5$, significa que espera-se que 50% dos itens dessa população tenham falhado nesse intervalo.

A função acumulada de falhas é representada por diferentes tipos de FDAs (Funções Distribuição Acumulada) de diferentes distribuições de probabilidades contínuas. Sendo assim, as distribuições de probabilidades citadas na seção 2.3 também são aplicáveis para a função acumulada de falhas.

Como uma FDA pode ser calculada integrando-se uma FDP, a função acumulada de falhas, para um intervalo entre x_1 e x_2 , pode ser calculada pela equação (11):

$$F(x) = F(x_2) - F(x_1) = \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx \quad (11)$$

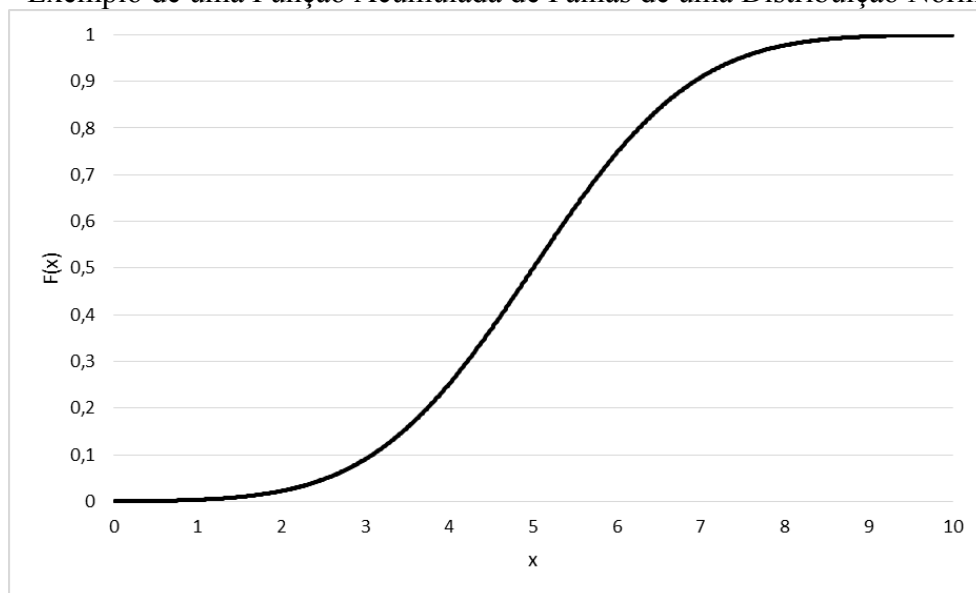
Em que:

- $f(x)$ é a função densidade de falhas da variável aleatória x ;
- $F(x)$ é a função acumulada de falhas da variável aleatória x .

Logo, o inverso também é válido:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (12)$$

Figura 9 - Exemplo de uma Função Acumulada de Falhas de uma Distribuição Normal



Fonte: produção do próprio autor

O gráfico Figura 9 da mostra um exemplo de função acumulada de falhas de uma distribuição normal, nele é possível verificar a variação de $F(x)$ ao longo da variável x , no

intervalo de $x = 0$ até $x = 10$. De modo que o $F(x)$ do gráfico da Figura 9 representa a área abaixo da curva do gráfico de $f(x)$ da Figura 8.

Por conta de $F(x)$ ser referente a uma distribuição de probabilidade contínua, a probabilidade de falha, quando o intervalo de x_1 a x_2 tende a zero, também tende a zero, de modo que a probabilidade de falha é igual a zero para qualquer instante pontual nesse modelo matemático. O que isso quer dizer é que não é possível atribuir a probabilidade de falha para um determinado instante de x , e sim apenas dizer qual a probabilidade dele falhar em determinado intervalo de x .

A função acumulada de falhas representa uma probabilidade, portanto, a condição $0 \leq F(x) \leq 1$ é obrigatória e qualquer resultado de $F(x)$ fora desse intervalo não é válido.

2.5 FUNÇÃO CONFIABILIDADE

A função confiabilidade representa a probabilidade de um determinado item estar operando sem falhas para um intervalo entre x_1 e x_2 , portanto, a função confiabilidade é o complemento da função acumulada de falhas e pode ser expressa pela equação (13):

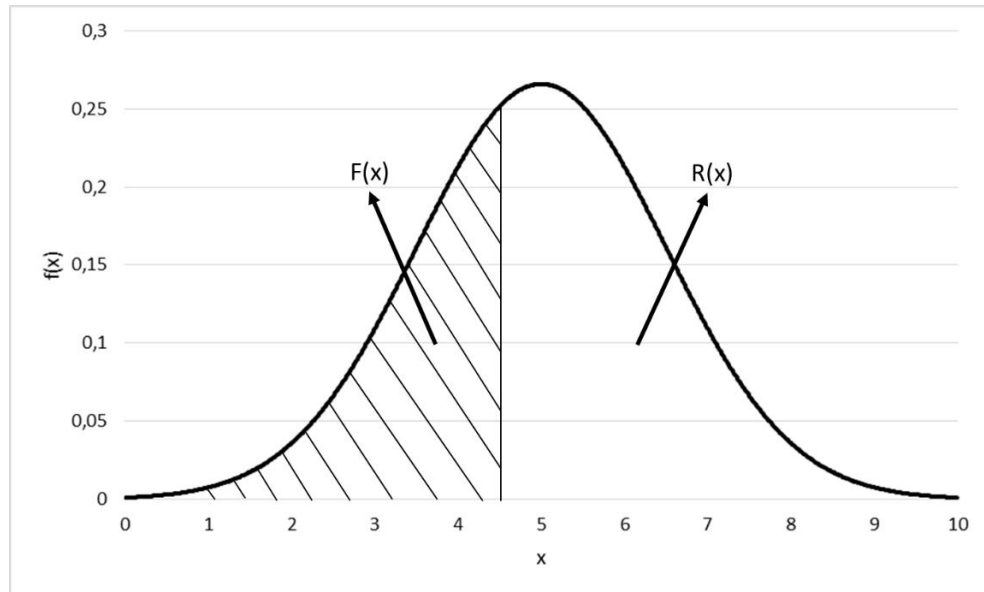
$$R(x) = 1 - F(x) \quad (13)$$

Em que:

- $R(x)$ é a função confiabilidade da variável aleatória x ;
- $F(x)$ é a função acumulada de falhas da variável aleatória x .

Logo, a função confiabilidade passa uma ideia complementar a representada pela função acumulada de falhas, ela busca quantificar, por meio de probabilidades, o sucesso do item e não a falha.

Figura 10 - Exemplo de uma Função Densidade de Falhas de uma Distribuição Normal com $F(x)$ e $R(x)$



Fonte: produção do próprio autor

No gráfico da Figura 10 é possível verificar a relação entre $f(x)$, $F(x)$ e $R(x)$, de modo que nesse exemplo o $F(x)$ é a área abaixo da curva de $f(x)$ até $x = 4,5$ e $R(x)$ é a área abaixo da curva de $f(x)$ a partir de $x = 4,5$, ou seja, o complemento de $F(x)$. Portanto, a soma de $F(x)$ e $R(x)$ é igual a 1, já que $F(x)$ representa a probabilidade de fracasso e $R(x)$ a probabilidade de sucesso.

A função confiabilidade tem um caráter muito importante no cálculo da função de taxa de falha, através da relação entre $f(x)$ e $R(x)$ é possível obter a função de taxa de falha $h(x)$, através da equação (14). O $h(x)$ pode ser entendido como uma taxa instantânea de falha em um determinado tempo, dado que não houve falha nesse tempo.

$$h(x) = \frac{f(x)}{R(x)} = \frac{f(x)}{1 - F(x)} \quad (14)$$

Em que:

- $h(x)$ é a função de taxa de falha da variável aleatória x ;
- $f(x)$ é a função densidade de falhas da variável aleatória x ;
- $R(x)$ é a função confiabilidade da variável aleatória x ;

- $F(x)$ é a função acumulada de falhas da variável aleatória x .

Quando a distribuição na qual as funções $f(x)$, $F(x)$ e $R(x)$ estão inseridas é a exponencial, a função $h(x)$ apresenta um caráter constante, comportamento característico de falhas aleatórias como apresentado na seção 2.1.

2.6 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A distribuição de Weibull é uma das mais importantes distribuições de probabilidade para o estudo da confiabilidade por conta da sua versatilidade e variedade de aplicações.

Essa distribuição tem um caráter tão importante para a confiabilidade porque pode assumir as características das principais distribuições de probabilidade contínua. Com ela é possível avaliar o comportamento da função densidade de falhas e da função acumulada de falhas de diferentes tipos de componentes devido a essa variedade de perfis que ela pode assumir.

A função densidade de falhas da distribuição de Weibull pode ser expressa por meio da equação (15):

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (x - x_0)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\eta}\right)^\beta} \text{ para } x \geq 0 \text{ e } f(x) = 0 \text{ para } x < 0 \quad (15)$$

Já a função acumulada de falhas da distribuição de Weibull, para um intervalo entre x_1 e x_2 , pode ser expressa por meio da equação (16):

$$F(x_2) - F(x_1) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = \left(-e^{-\left(\frac{x_2-x_0}{\eta}\right)^\beta} \right) - \left(-e^{-\left(\frac{x_1-x_0}{\eta}\right)^\beta} \right) = e^{-\left(\frac{x_1-x_0}{\eta}\right)^\beta} - e^{-\left(\frac{x_2-x_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (16)$$

Em que:

- $F(x)$ é a função acumulada de falhas da variável aleatória x ;
- $f(x)$ é a função densidade de falhas da variável aleatória x ;

- x_0 é a vida inicial do item;
- β é o parâmetro de forma da distribuição de Weibull;
- η é o parâmetro de escala da distribuição de Weibull.

Nos casos especiais em que o x_1 é a própria vida inicial, ou seja, $x_1 = x_0$, a equação (16) passa a ser:

$$F(x_2) - F(x_0) = \int_{x_0}^{x_2} f(x)dx = 1 - e^{-\left(\frac{x_2 - x_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (17)$$

Logo, a função acumulada de falhas da distribuição de Weibull para o intervalo de x_0 até qualquer valor de x é dado pela equação (18):

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x - x_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (18)$$

Sendo a equação (18) a mais utilizada por demonstrar a probabilidade acumulada de falha desde o instante inicial da vida do componente até qualquer instante de x .

A função de taxa de falha da distribuição de Weibull pode ser calculada através da equação (19):

$$h(x) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{x - x_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (19)$$

Nas equações (15), (16), (17), (18) e (19) é importante observar os parâmetros x_0 , β e η , eles são a base para o estudo da distribuição de Weibull e consequentemente para a avaliação da confiabilidade de um componente.

O parâmetro x_0 , chamado de vida inicial, mostra o instante em que a probabilidade do componente ter falhado é igual a 0. Quando seu valor é positivo significa que o componente em análise apresenta um período (de 0 até x_0) em que a probabilidade de ter falhado é igual a 0, esse período é chamado de garantia, ou seja, o período em que o fabricante espera que o

componente não irá falhar. Quando o x_0 apresenta um valor negativo significa que o componente apresenta uma probabilidade de ter falhado maior que 0 antes de entrar em operação (período de x_0 até 0), quando um componente apresenta essa característica costuma-se dizer que ele tem vida de prateleira. Normalmente o valor de x_0 é igual a 0, o que significa que a probabilidade de ter falhado é igual a 0 apenas no instante em que o componente entra em operação, ou seja, o instante 0 da vida do componente. Nesse trabalho foi assumido que todos os componentes analisados têm um x_0 igual a 0, porque se aproxima mais da realidade.

O parâmetro β , chamado de parâmetro de forma da distribuição de Weibull, como o próprio nome diz é o parâmetro que dá forma a distribuição de Weibull, ou em outras palavras, aquele que determina as características das quais a distribuição de Weibull assume no quesito forma. Existem alguns valores característicos de β que fazem a distribuição de Weibull representar algumas distribuições conhecidas, quando β vale 1 a distribuição de Weibull assume o mesmo comportamento de uma distribuição exponencial, já quando β vale 3,44 ela assume o comportamento aproximado de uma distribuição normal (Gaussiana), exceto pelas caudas, segundo a norma IEC 61649 (2008). O valor de β interfere diretamente no comportamento da função de taxa de falha, como pode ser observado através da equação (19) e na Figura 13, já que ele atua diretamente nas características da função densidade de falhas e da função acumulada de falhas da distribuição de Weibull (ver Figura 11 e Figura 12), na Tabela 1 é possível verificar a influência de β na função de taxa de falha.

Tabela 1 - Comportamento da Função de Taxa de Falha em Função de β

β	Comportamento da Função Taxa de Falha
<1	Taxa de falha crescente com o tempo - fase de mortalidade infantil
$=1$	Taxa de falha constante - falhas aleatórias - função exponencial
>1	Taxa de falha crescente com o tempo
$=2$	Taxa de falha linearmente crescente
>2	Taxa de falha cresce a uma taxa proporcional à potência (-1); distribuição de frequência tornando-se mais simétrica à medida que β cresce
$=3,44$	Distribuição de frequência aproxima-se da distribuição normal, tornando-se menos dispersa à medida que β cresce

Fonte: adaptado de Lafraia (2001)

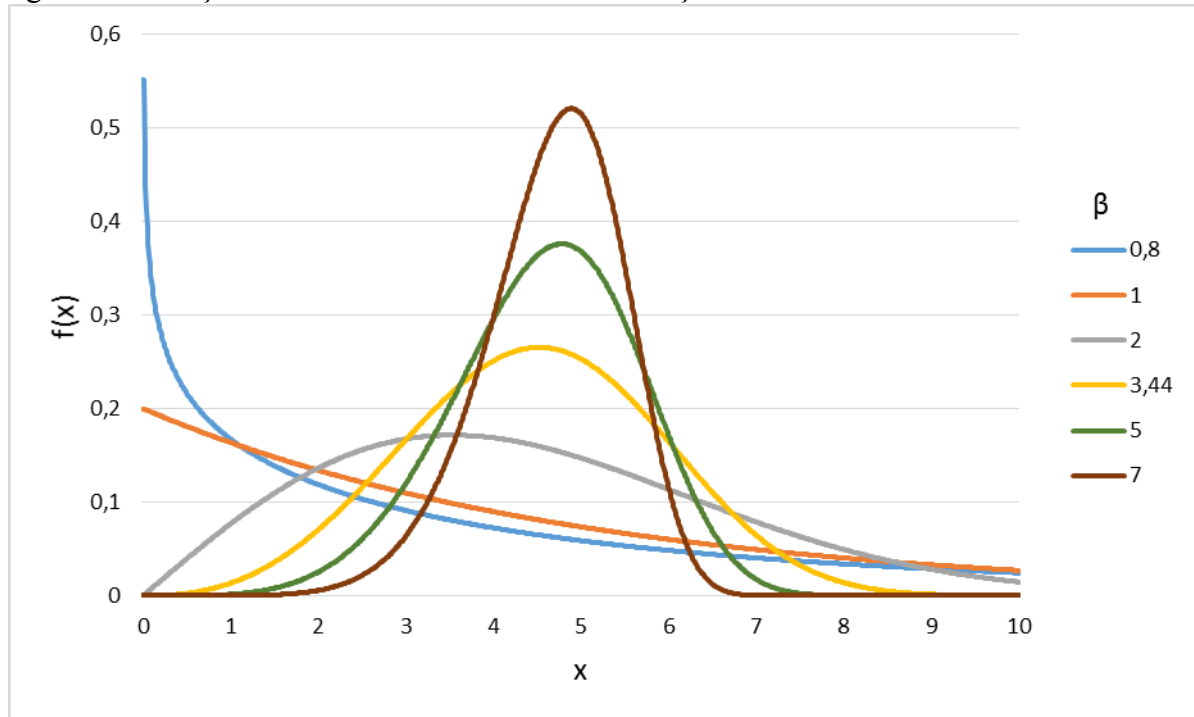
O parâmetro η , chamado de parâmetro de escala da distribuição de Weibull, como próprio nome diz é aquele que determina a escala em que se está trabalhando, ou seja, ele mostra a ordem de grandeza da variável aleatória x em que a distribuição de Weibull está inserida. O parâmetro η pode ser definido como o intervalo entre x_0 e x no qual espera-se que ocorram 63,2% das falhas, ou seja, o intervalo entre x_0 e x no qual $F(x) = 63,2\%$.

Uma característica importante é que para qualquer tipo de distribuição de Weibull na qual se mantém os valores de x_0 e η , o valor de x que faz $F(x) = 63,2\%$ é sempre o mesmo para qualquer valor de β , na Figura 12 é possível observar essa característica com clareza. Isso se deve ao fato de que quando $x - x_0$ assume o valor de η , a função de $F(x)$ apresenta um resultado de 63,2%, independentemente do valor de β , na equação (20) é possível entender o porquê disso:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-x_0}{\eta}\right)^\beta} = 1 - e^{-1} = 1 - 0,368 = 0,632 = 63,2\% \quad (20)$$

A Figura 11 mostra a função densidade de falhas da distribuição de Weibull para diferentes valores de β , com $\eta = 5$ e $x_0 = 0$:

Figura 11 - Função Densidade de Falhas da Distribuição de Weibull

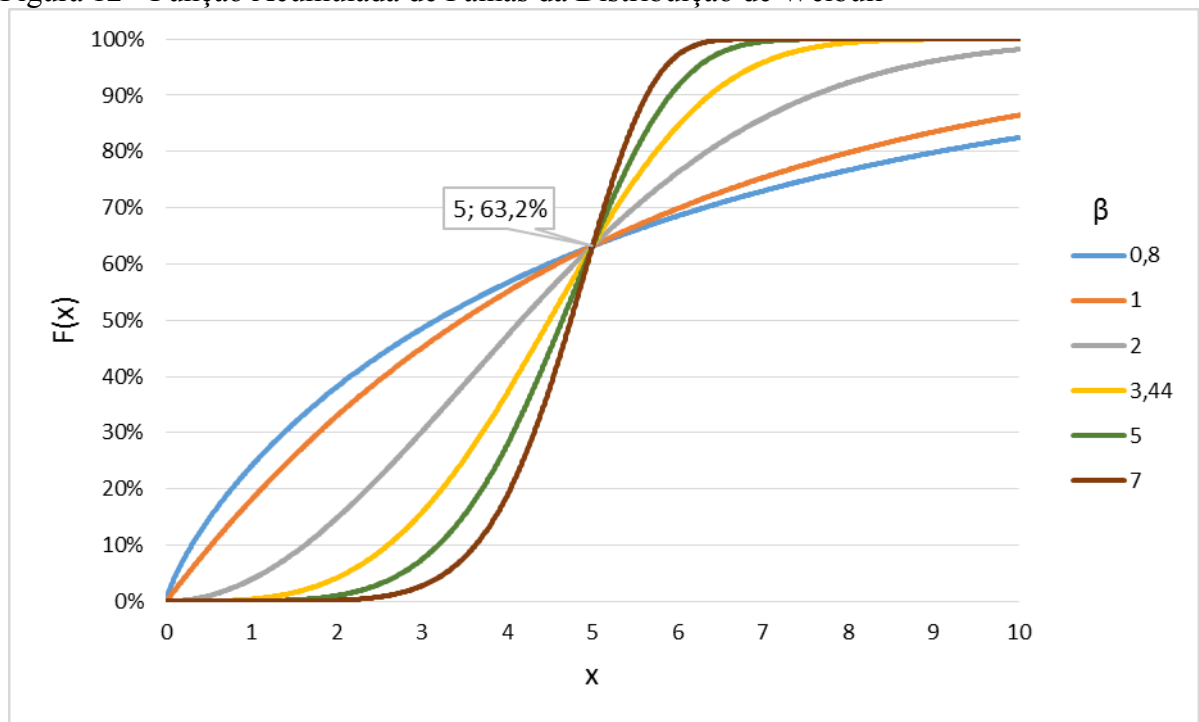


Fonte: produção do próprio autor

Como apresentado anteriormente, pode-se ver através da Figura 11, que para um $\beta = 0,8$ a função densidade de falhas da distribuição de Weibull tem uma característica decrescente (curva azul), para $\beta = 1$ ela se torna exponencial (curva laranja) e para $\beta = 3,44$ ela se aproxima de uma distribuição normal (curva amarela).

A Figura 12 mostra a função acumulada de falhas da distribuição de Weibull para diferentes valores de β , com $\eta = 5$ e $x_0 = 0$:

Figura 12 - Função Acumulada de Falhas da Distribuição de Weibull

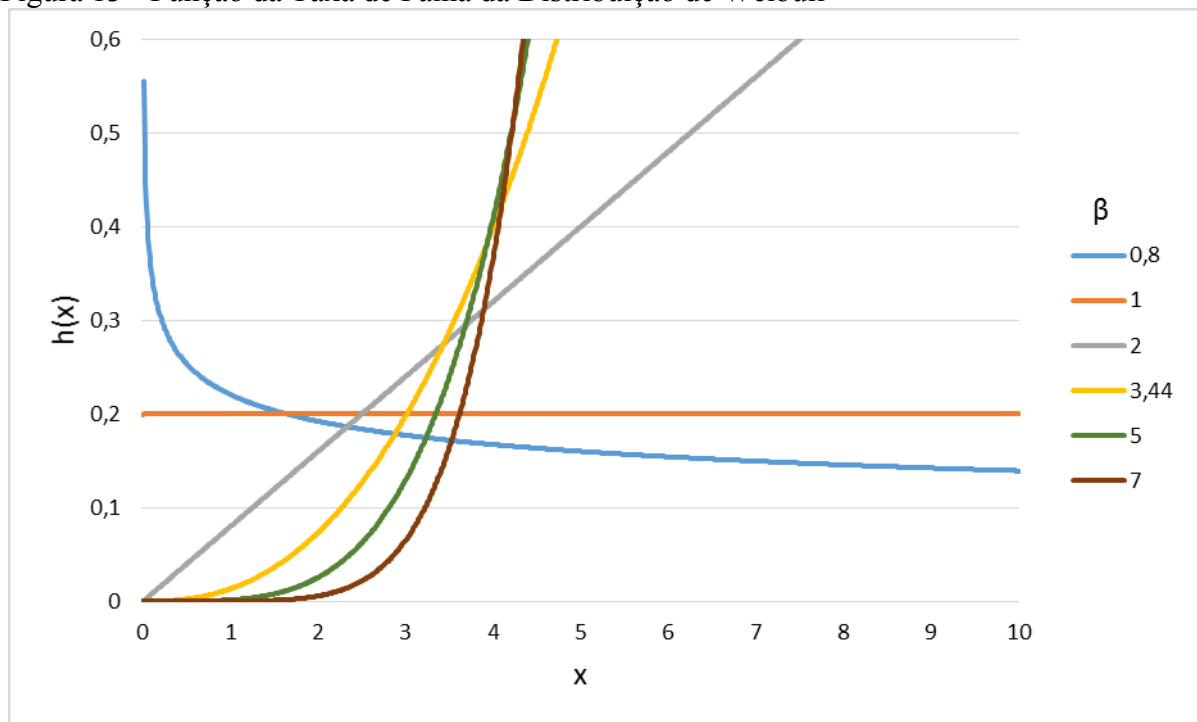


Fonte: produção do próprio autor

Na Figura 12 pode-se observar que mantendo-se η e x_0 constantes, nesse caso 5 e 0, respectivamente, quando x assume o valor de η tem-se $F(x) = 63,2\%$ para qualquer valor de β .

A Figura 13 mostra a função da taxa de falha de uma distribuição de Weibull para diferentes valores de β , com $\eta = 5$ e $x_0 = 0$:

Figura 13 - Função da Taxa de Falha da Distribuição de Weibull



Fonte: produção do próprio autor

Na Figura 13 é possível ver que a função de taxa de falha varia sua forma de acordo com o valor de β . Vê-se que quando $\beta = 0,8$ ela é decrescente (curva azul), quando $\beta = 1$ ela é constante (curva laranja) e para $\beta > 1$ ela é crescente, de forma que $\beta = 2$ é um caso especial no qual ela é linearmente crescente (curva cinza).

A Tabela 2 apresenta mais detalhes sobre a relação entre os parâmetros da distribuição de Weibull e suas interpretações para o estudo da confiabilidade de alguns componentes:

Tabela 2 - Interpretações Físicas Sobre os Parâmetros da Função de Weibull

x_0	β	Interpretações Físicas Sobre os Parâmetros da Função de Weibull
=0		Não há confiabilidade intrínseca. Significa que em $t=0$ a probabilidade de falha é 0
	<1	Taxa de falhas decrescentes, possivelmente devida a baixos coeficientes de segurança na carga
	=1	Taxa de falhas constante, falhas de origem aleatórias
	>1	Taxa de falhas crescente, desgaste iniciando logo que o componente entra em serviço
>0		Há período de garantia, durante o qual não ocorre falha. O componente possui confiabilidade intrínseca
	<1	Desgaste do tipo fadiga ou similar
	$\approx 0,5$	Fadiga de baixo ciclo
	$\approx 0,8$	Fadiga de alto ciclo
	>1	Desgaste do tipo erosão
<0		Há vida de prateleira, o componente pode falhar antes de ser usado
	<1	Desgaste do tipo fadiga, iniciado antes do componente entrar em serviço
	>1	Desgaste devido à contínua redução da resistência

Fonte: adaptado de Lafraia (2001)

O MTTF/MDTF do componente pode ser calculado através dos parâmetros β , x_0 e η da distribuição de Weibull com a equação (21):

$$MTTF / MDTF = x_0 + \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (21)$$

Em que:

- Γ é a função gama.

As funções densidade de falhas e as funções acumuladas de falhas, bem como os parâmetros β , x_0 e η desempenham um papel importante no estudo não só da confiabilidade, mas também da manutenção, com essas informações é possível determinar os melhores momentos para se executar uma manutenção em determinado sistema e os melhores tipos de manutenção, através da análise de seus componentes.

2.7 INTERVALO DE CONFIANÇA

Para entender o intervalo de confiança deve-se entender a diferença entre população, também chamado de universo, e amostra. Martins (2001) define população como a totalidade de itens, objetos ou pessoas sob consideração e amostra como uma parte da população que é selecionada para análise.

Quando se realiza um experimento utilizando técnicas estatísticas, o objetivo geralmente é achar o valor de determinado parâmetro de uma população (parâmetro populacional real). Entretanto, na maioria das vezes é impossível avaliar a população inteira por limitação de recursos ou pelo simples fato de seu tamanho elevado inviabilizar a avaliação de todos os elementos dessa população. Com isso, os estudos costumam ser feitos em uma parte dos elementos da população, ou seja, em uma amostra da população. Portanto, não se pode atribuir um valor exato para o parâmetro populacional real procurado através de uma amostra, já que não se observou todos os elementos dessa população.

O intervalo de confiança tem como objetivo contornar o fato de não ser possível achar com exatidão o parâmetro populacional real a partir de uma amostra. Ele é uma amplitude de valores que se atribui para determinado parâmetro populacional através de uma amostra retirada da população em estudo, podendo essa amplitude de valores conter o parâmetro populacional real procurado.

Existem dois tipos de intervalos de confiança, os unilaterais e os bilaterais, intervalos de confiança unilaterais são aqueles que apresentam apenas um limite, superior ou inferior. Ou seja, um intervalo de confiança unilateral com limite superior significa que se estima, através de uma amostra, que o parâmetro procurado tem um valor menor ou igual ao limite superior definido pelo intervalo de confiança. De forma análoga, um intervalo de confiança unilateral

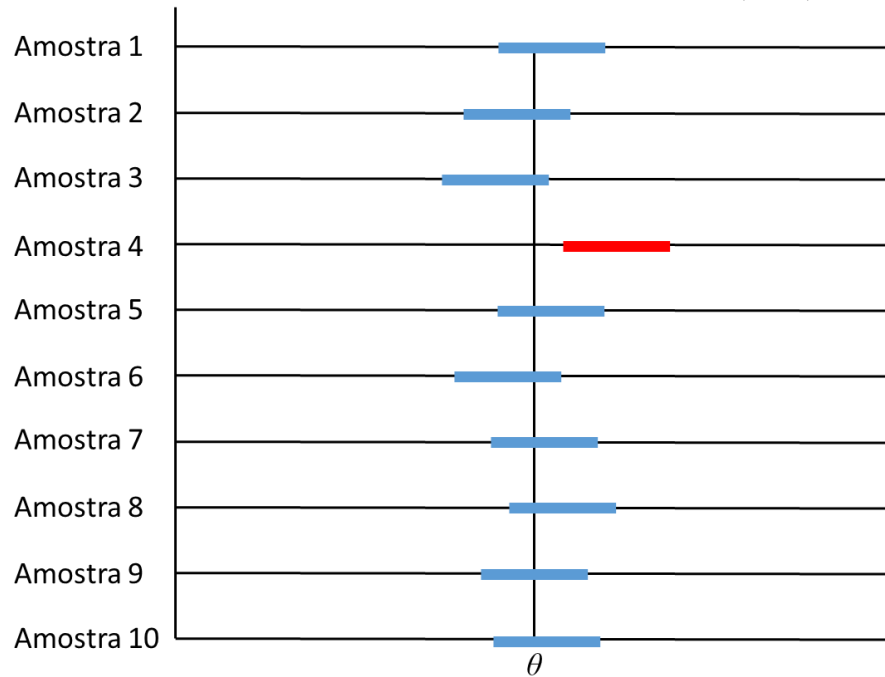
com limite inferior significa que se estima, através de uma amostra, que o parâmetro procurado tem um valor maior ou igual ao limite inferior definido pelo intervalo de confiança.

Já os intervalos de confiança bilaterais são aqueles que apresentam dois limites, superior e inferior. Ou seja, um intervalo de confiança bilateral significa que se estima, através de uma amostra, que o parâmetro procurado tem um valor entre o limite inferior e o limite superior do intervalo.

Quando se estima um intervalo de confiança naturalmente ele pode não conter o parâmetro populacional procurado, já que é construído a partir de uma amostra da população, como visto anteriormente. Esse risco é representado por α , sendo α chamado de nível de significância. Já o nível de confiança representa o quão provável é de a estimativa por intervalo conter o parâmetro populacional real, sendo calculado por $(1 - \alpha)$. Vale ressaltar que α não é a probabilidade do parâmetro populacional real não estar dentro do intervalo de confiança, assim como $(1 - \alpha)$ não é a probabilidade do parâmetro populacional real estar dentro do intervalo de confiança. Isso acontece porque o parâmetro populacional real é um valor fixo e não uma variável, portanto, não faz sentido atribuir uma probabilidade de ele assumir algum valor, segundo a IEC 60605-4 (2001). A interpretação correta para o nível de confiança e de significância é que se fossem construídos intervalos de confiança para um grande número de amostras diferentes de uma mesma população, espera-se que $(1 - \alpha)\%$ contenham o parâmetro populacional real procurado e os outros $\alpha\%$ não contenham, segundo Martins (2001).

Uma analogia interessante apresentada em Martins (2001) sobre o nível de confiança é que caso se obtenha 10 intervalos de confiança bilaterais para um determinado parâmetro de uma população, chamado de θ , a partir de 10 amostras diferentes de mesmo tamanho da mesma população em análise, com um nível de confiança de $(1 - \alpha) = 90\%$, espera-se que dos 10 diferentes intervalos de confiança gerados a partir das 10 amostras, um deles não contenha o parâmetro populacional real θ . A Figura 14 ilustra essa analogia graficamente.

Figura 14 - Intervalo de Confiança para 10 Amostras Diferentes com $(1 - \alpha) = 90\%$



Fonte: adaptado de Martins (2001)

A Figura 14 representa um teste no qual foram avaliadas 10 amostras diferentes de uma mesma população, de forma que foram gerados um intervalo de confiança para o parâmetro populacional real θ em cada uma das amostras. Os intervalos gerados são representados pelas barras azuis e pela barra vermelha e o valor de θ é representado pela linha vertical no centro da figura. Como o nível de confiança atribuído para os 10 intervalos foi de $(1 - \alpha) = 90\%$, um desses 10 intervalos não continha o valor de θ real, sendo esse intervalo retirado da amostra de número 4, na Figura 14, e representado pela barra vermelha. Entretanto, os outros 9 intervalos continham o valor de θ real, sendo eles representados pelas barras azuis na Figura 14.

A utilização do intervalo de confiança não se restringe apenas à confiabilidade, sendo muito usado em diferentes aplicações de estatística para levantamentos de inúmeros parâmetros. Nesse trabalho o objetivo da utilização do intervalo de confiança é de estimar a taxa de falha e o MTTF/MDTF dos componentes.

3 METODOLOGIAS UTILIZADAS NAS ANÁLISES

As metodologias utilizadas nas técnicas que serão apresentadas a seguir baseiam-se nas normas internacionais IEC 61649 (2008) para a seção 3.1 e IEC 60605-4 (2001) para seção 3.2. A partir delas é possível desenvolver todos os conceitos e parâmetros de confiabilidade apresentados no capítulo 2 para um determinado componente em análise.

Vale ressaltar que a metodologia da IEC 61649 (2008) se aplica apenas a itens não-reparáveis. Existe uma técnica para a avaliação da confiabilidade de itens-reparáveis baseada em um modelo matemático chamado de *Power Law Model* ou Modelo da Lei da Potência, em português, apresentado por Crow (1975) e coberto pela norma internacional IEC 61710 (2013) que não faz parte do escopo desse trabalho.

Crow (1975) sugere que em um sistema complexo a primeira falha será referente a um componente individual que o compõem, então, esse componente deverá ser substituído para que o sistema seja reparado. Com isso, o sistema passa a conter componentes em diferentes idades, um no início da sua vida e os outros já um pouco envelhecidos. Conforme outras falhas vão ocorrendo, os componentes que falharam vão sendo substituídos para se reparar o sistema, chegará um momento que esse mesmo sistema apresentará vários componentes em diferentes idades, esse tipo de reparo é chamado de reparo mínimo por Crow (1975). Então, após a ocorrência da primeira falha a melhor abordagem para a avaliação da confiabilidade do sistema será o *Power Law Model*, segundo Crow (1975), e não a técnica que será apresentada na seção 3.1, que se refere a componentes individuais, ou seja, itens não-reparáveis.

3.1 LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Como discutido na seção 2.6, a distribuição de Weibull depende de três parâmetros o x_0 , o β e o η . A seguir é apresentado formas de se obter os parâmetros β e η a partir de um conjunto de dados sobre as falhas observadas em uma determinada população de componentes do mesmo tipo. Durante as análises assume-se que $x_0 = 0$, portanto, considera-se que o componente em análise não apresenta nem vida de prateleira e nem período de garantia (discussão presente na seção 2.6).

A técnica que será apresentada nessa seção costuma ser chamada de análise de Weibull, sendo ela coberta pela norma internacional IEC 61649 (2008). Essa norma apresenta três diferentes formas de se analisar dados distribuídos por Weibull com o objetivo de determinar

os parâmetros β e η , sendo que a utilizada nesse trabalho é a forma gráfica, essa técnica serve apenas para a análise de itens não-reparáveis segundo a IEC 61649 (2008). Portanto, nesse trabalho ela é utilizada para a análise de alguns componentes de uma das frotas de trens do sistema metroviário da cidade de São Paulo - SP.

As primeiras considerações que a norma exige para a sua aplicação é que os dados analisados sejam independentes e identicamente distribuídos, podendo essas considerações serem testadas através da norma IEC 60300-3-5 (2001) ou assumidas como verdadeiras. No caso em questão as considerações foram assumidas como verdadeiras, já que os dados analisados são tempos para a falha de componentes do mesmo tipo de diferentes trens em operação comercial de uma mesma frota, logo são distribuídos de forma idêntica e são independentes (a falha de um não interfere na falha de outro).

A IEC 61649 (2008) contém uma tabela na qual mostra a relação entre o que é coberto (C) pela norma através de seus métodos e o que não é (NC), a Tabela 3 apresenta essa relação para o método gráfico com base nas informações contidas na norma:

Tabela 3 - Relação dos Métodos ou Tipos de Dados com o Método Gráfico

Método ou Tipo de Dados	Método Gráfico
Censura em Intervalo	C
Censura Múltipla	C
Censura Única	C
Zero Falhas	NC
Amostra Pequena (≤ 20)	C
Amostra Grande	C
Dados Curvos	C
Dados Completos	C
C = Coberto e NC = Não Coberto	

Fonte: adaptado de IEC 61649 (2008)

Os dados utilizados nesse trabalho podem apresentar todas as características presentes na Tabela 3, exceto dados curvos, eles representam componentes com x_0 diferente de 0, o que não é possível segundo a presunção feita no início dessa seção. Para os componentes que não apresentaram falhas, bem como aqueles que apresentaram uma única falha, durante o período de observação não é possível aplicar o método gráfico. Para esses casos a situação pode ser contornada por meio da técnica do levantamento do intervalo de confiança, que está presente

na seção 3.2, permitindo apenas ter uma ideia da taxa de falha ou do MTTF/MDTF do componente em análise fazendo-se algumas considerações.

O método gráfico apresentado na IEC 61649 (2008) é chamado de *Median Rank Regression* (MRR) ou Regressão de Posição Média em português. Este método se divide em duas formas diferentes para se lidar com os dados, sendo uma utilizada para testes com componentes suspensos, ou seja, componentes que foram retirados do teste antes da sua finalização por algum motivo. Essa forma de abordagem não é utilizada nesse trabalho por conta dos dados utilizados não se encaixarem nessa característica, a outra forma é para componentes censurados na falha ou no tempo. Censura na falha é aquela em que o teste é encerrado após a verificação de um determinado número de falhas e censura no tempo é quando o teste é finalizado após um determinado período de tempo, sem que todos os componentes em análise tenham falhado.

No caso em questão a censura é no tempo, porque o teste na verdade é a observação das falhas dos componentes da frota de trens em operação comercial durante o período de demonstração da confiabilidade, período no qual a empresa fornecedora do material rodante deve acompanhar a confiabilidade do seu produto para garantir que as metas definidas no contrato sejam cumpridas.

A determinação de β e η da distribuição de Weibull para um componente por meio do MRR se divide em alguns passos, o primeiro deles é coletar os tempos para falha de cada componente (do mesmo tipo) e ordená-los do mais antigo para o mais recente, atribuindo uma classificação de 1 até o número de falhas observadas para cada um deles, ou seja, a falha mais antiga será a número 1 e a mais recente será o número de falhas observadas. Após a classificação, deve-se estimar o percentual acumulado de falhas F_i para cada uma das falhas através da equação (22), conhecida como aproximação de Benard, IEC 61649 (2008):

$$F_i = 100 \cdot \frac{i - 0,3}{j + 0,4} \quad (22)$$

Em que:

- i é a classificação da falha;
- F_i é o percentual acumulado de falhas para a falha i ;
- j é a quantidade de componentes observados durante o teste.

Com todos os F_i estimados há duas opções a seguir, a primeira é plotar manualmente os pontos $[x_i; F_i]$ em um papel especial chamado de papel de probabilidade de Weibull e então traçar a reta média entre os pontos, a partir dessa reta e do uso adequado do papel é possível levantar os valores de β e η do componente em análise. Essa opção não é utilizada nesse trabalho, já que por conta de ser feita manualmente há uma inserção de erro no resultado. A segunda opção é feita com auxílio de softwares, onde é gerado uma tabela em que se calcula os valores de $\ln(x_i)$ e $\ln(-\ln(1 - F_i))$ para cada uma das falhas i , a partir desses cálculos é feita a regressão linear para os pontos $[\ln(x_i); \ln(-\ln(1 - F_i))]$ gerados pelas falhas i , a partir dessa regressão retira-se os valores de A e B que representam o coeficiente angular e linear, respectivamente, da reta média entre os pontos. Com os valores de A e B é possível chegar a β e η através das equações (23) e (24):

$$\beta = A \quad (23)$$

$$\eta = e^{-B/A} \quad (24)$$

Em que:

- β é o parâmetro de forma da distribuição de Weibull;
- η é o parâmetro de escala da distribuição de Weibull;
- A é o coeficiente angular da reta gerada pela regressão linear;
- B é o coeficiente linear da reta gerada pela regressão linear.

A Tabela 4 mostra um exemplo de abordagem para o procedimento como um todo descrito anteriormente:

Tabela 4 - Exemplo de Tabela Utilizada para o Levantamento de β e η

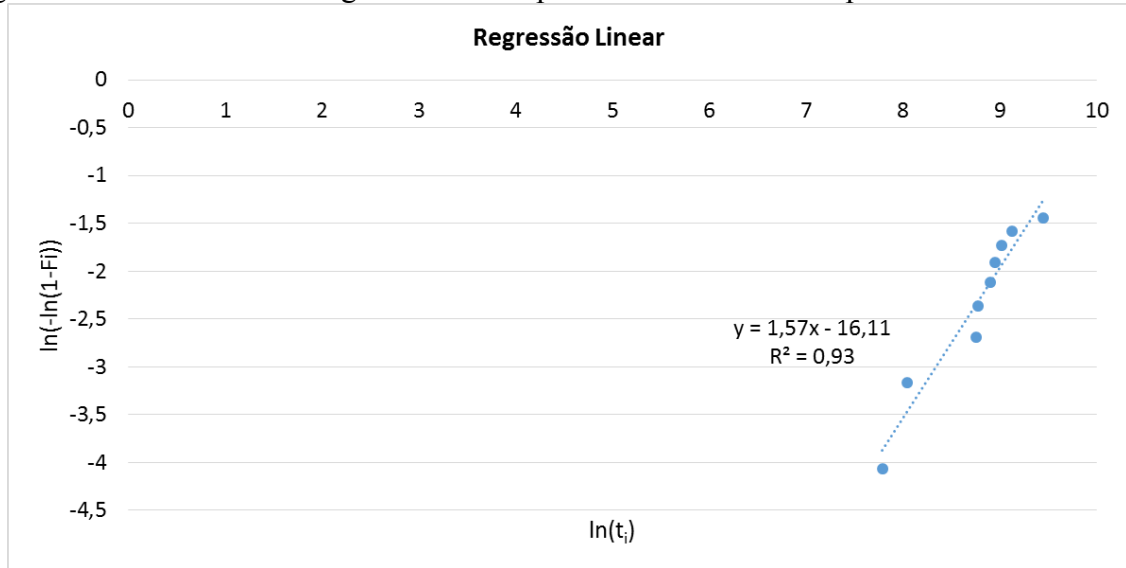
Falhas				
i	t_i [h]	F_i	$\ln(-\ln(1-F_i))$	$\ln(t_i)$
1	2.403	1,69%	-4,07	7,78
2	3.120	4,11%	-3,17	8,05
3	6.360	6,52%	-2,70	8,76
4	6.440	8,94%	-2,37	8,77
5	7.360	11,35%	-2,12	8,90
6	7.700	13,77%	-1,91	8,95
7	8.200	16,18%	-1,73	9,01
8	9.180	18,60%	-1,58	9,12
9	12.700	21,01%	-1,44	9,45

Fonte: produção do próprio autor

No exemplo da Tabela 4 foram verificadas 9 falhas, conforme o método apresentado elas foram organizadas da mais antiga para a mais recente, representadas pelo tempo que cada falha demorou para acontecer em horas (coluna t_i [h] da Tabela 4), com isso atribui-se a classificação de 1 a 9 para cada uma delas (coluna i da Tabela 4). Posteriormente, foi calculado o percentual acumulado de falhas F_i , através da equação (22), para cada uma das 9 falhas (coluna F_i da Tabela 4) e então calculou-se os valores de $\ln(-\ln(1-F_i))$ e $\ln(t_i)$, representado pelas últimas duas colunas da Tabela 4, respectivamente.

A Figura 15 mostra o gráfico com os pontos $[\ln(x_i); \ln(-\ln(1-F_i))]$ da Tabela 4 e a reta gerada pela regressão linear com sua respectiva equação e seu coeficiente de determinação (R^2):

Figura 15 - Gráfico com a Regressão Linear para os Pontos Gerados pelas Falhas



Fonte: produção do próprio autor

Utilizando-se as equações (23) e (24) para o exemplo da Tabela 4 e com o auxílio da equação gerada pela regressão linear (Figura 15), pode-se chegar aos valores de β e η da distribuição de Weibull, através das equações (25) e (26). Além disso, a partir do coeficiente de determinação (R^2) pode-se avaliar a qualidade dos dados, no caso da Figura 15 o valor de $R^2 = 0,93$, em uma escala que vai de 0 até 1, para os pontos $[\ln(t_i) ; \ln(-\ln(1 - F_i))]$ indica que os dados estão com uma boa qualidade.

$$\beta = A = 1,57 \quad (25)$$

$$\eta = e^{-B/A} = e^{-(-16,11)/1,57} = 28.155 \text{ h} \quad (26)$$

Com os valores de β e η é possível gerar todas as funções apresentadas na seção 2.6 com seus respectivos gráficos, além de poder analisar o componente tanto de forma quantitativa quanto qualitativa.

3.2 LEVANTAMENTO DO INTERVALO DE CONFIANÇA PARA λ E MTTF/MDTF

As técnicas para o levantamento do intervalo de confiança da taxa de falha e do MTTF/MDTF é apresentada na norma internacional IEC 60605-4 (2001), tanto para testes com censura no tempo quanto para testes com censura na falha. Nesse trabalho será utilizado apenas as técnicas ligadas a censura no tempo, pelo mesmo motivo explicado na seção 3.1.

A IEC 60605-4 (2001) apresenta metodologias para o levantamento de intervalos de confiança unilaterais, ou seja, aqueles que estão contidos acima ou abaixo de um valor específico, apresentando apenas um limite, inferior ou superior. A norma também apresenta metodologias para o levantamento de intervalos de confiança bilaterais, ou seja, aqueles que estão contidos entre dois valores específicos, apresentando um limite inferior e um superior. Nesse trabalho apenas os intervalos bilaterais são utilizados, por apresentar uma melhor noção do valor procurado.

Os parâmetros da população a serem estimados com essa técnica são a taxa de falha e o MTTF/MDTF, ou seja, valores constantes, e como discutido nas seções anteriores isso só vale para distribuições exponenciais. Portanto, o intervalo de confiança é utilizado nesse trabalho assumindo-se que as funções densidade de falhas e as funções acumulada de falhas respeitam as características de uma distribuição exponencial.

Apesar de nem todos os componentes apresentarem distribuições exponenciais, o uso do intervalo de confiança se justifica para se ter uma ideia de grandeza da taxa de falha e do MTTF/MDTF do componente em análise. Portanto, o intervalo de confiança é usado como uma ferramenta de comparação e validação de resultados. Além de ser uma alternativa para situações em que se tenha verificado poucas ou nenhuma falha durante o período de observação, ou ainda, quando se tenha verificado falhas, mas não estejam disponíveis os momentos em que elas ocorreram, impedindo o uso das técnicas apresentadas na seção 3.1. Entretanto, a distribuição de Weibull, apresentada na seção 2.6, representa melhor o comportamento das falhas de um componente do que o intervalo gerado com essa técnica.

O levantamento do intervalo de confiança para a taxa de falha ou para o MTTF/MDTF é baseado na distribuição qui-quadrado, sendo que essa distribuição é parametrizada por duas variáveis, chamadas de grau de liberdade (φ) e nível de significância (α), do qual se obtém o nível de confiança ($1 - \alpha$), expresso normalmente em porcentagem.

Outro ponto importante no levantamento do intervalo de confiança para a taxa de falha ou para o MTTF/MDTF é o acumulado de X_{on} durante o teste, chamado de X^* nesse trabalho,

ele expressa a quantidade total de x que os itens em análise acumularam durante o período de observação. Por exemplo, se x for o tempo e o teste foi realizado para um único item, X^* será o total de horas que esse item esteve em operação. Se 2 itens, necessariamente do mesmo tipo, forem colocados em teste e x for o tempo, X^* será o total de horas que cada item esteve em operação somados, e assim por diante. Matematicamente, o X^* pode ser expresso pela equação (27):

$$X^* = \sum_1^j (X_{on_j}) \quad (27)$$

Em que:

- X^* é o acumulado de X_{on} durante o período de observação;
- X_{on_j} é a quantidade total de x que o item j esteve em operação durante o período de observação.

Para testes em que houve substituição dos itens em análise, por exemplo, testes com itens não-reparáveis que quando falham precisam ser trocados, o limite inferior da taxa de falha pode ser expresso pela equação (19), sendo essa equação baseada na norma IEC 60605-4 (2001):

$$\lambda_{x_{ICS}} = \frac{\chi_{\alpha/2}^2 (2 \cdot n)}{2 \cdot X^*} \quad (28)$$

Em que:

- $\lambda_{x_{ICS}}$ é o limite inferior do intervalo de confiança bilateral da taxa de falha, para a variável x , em testes com substituição de itens;
- α é o nível de significância;
- n é o número ocorrências de falhas no item durante o período de observação;
- $\chi_{\alpha/2}^2 (2 \cdot n)$ é a distribuição qui-quadrado para $\alpha/2$ com $2 \cdot n$ graus de liberdade;

- X^* é o acumulado de X_{on} durante o período de observação.

Já o limite superior pode ser expresso pela equação (29):

$$\lambda_{xSCS} = \frac{\chi^2_{1-\alpha/2}(2 \cdot n + 2)}{2 \cdot X^*} \quad (29)$$

Em que:

- λ_{xSCS} é o limite superior do intervalo de confiança bilateral da taxa de falha, para a variável x , em testes com substituição de itens;
- $\chi^2_{1-\alpha/2}(2 \cdot n + 2)$ é a distribuição qui-quadrado para $1 - \alpha/2$ com $2 \cdot n + 2$ graus de liberdade.

Se a variável x for o tempo, pode-se entender através das equações (4), (28) e (29) que o intervalo de confiança para o MTTF pode ser expresso pela equação (30), já que o inverso da taxa de falha no tempo resulta no MTTF, como explicado na seção 2.2. Entretanto, o limite inferior do MTTF deve ser calculado através do limite superior da taxa de falha no tempo (λ_{tSCS}) e o limite superior do MTTF deve ser calculado através do limite inferior da taxa de falha do tempo (λ_{tICS}). Caso contrário, seria obtido um limite inferior maior que o limite superior para o MTTF.

$$\frac{1}{\lambda_{tSCS}} \leq MTTF_{IC} \leq \frac{1}{\lambda_{tICS}} \quad (30)$$

Em que:

- $MTTF_{IC}$ é o intervalo de confiança bilateral do MTTF.

Assim como, se a variável x for a distância, pode-se entender que o intervalo para o MDTF nesse caso é:

$$\frac{1}{\lambda_{dSCS}} \leq MDTF_{IC} \leq \frac{1}{\lambda_{dICS}} \quad (31)$$

Em que:

- $MDTF_{IC}$ é o intervalo de confiança bilateral do MDTF.

Para testes em que não houve substituição dos itens em análise, a norma apresenta expressões muito parecidas com as utilizadas para testes em que houve substituição. Através da norma e com algumas adaptações para a realidade desse trabalho, o limite inferior da taxa de falha pode ser expresso pela equação (32):

$$\lambda_{xISS} = \frac{\chi_{\alpha/2}^2 (2 \cdot n + 1)}{2 \cdot X^*} \quad (32)$$

Em que:

- λ_{xISS} é o limite inferior do intervalo de confiança bilateral da taxa de falha, para a variável x , em testes sem substituição de itens;
- $\chi_{\alpha/2}^2 (2 \cdot n + 1)$ é a distribuição qui-quadrado para $\alpha/2$ com $2 \cdot n + 1$ graus de liberdade.

Já o limite superior pode ser expresso pela equação (33):

$$\lambda_{xSSS} = \frac{\chi_{1-\alpha/2}^2 (2 \cdot n + 1)}{2 \cdot X^*} \quad (33)$$

Em que:

- λ_{xSSS} é o limite superior do intervalo de confiança bilateral da taxa de falha, para a variável x , em testes sem substituição de itens;

- $\chi^2_{1-\alpha/2}(2 \cdot n + 1)$ é a distribuição qui-quadrado para $1-\alpha/2$ com $2 \cdot n + 1$ graus de liberdade.

Se a variável x for o tempo, assim como explicado anteriormente na equação (30), pode-se entender que o intervalo de confiança para o MTTF é:

$$\frac{1}{\lambda_{tSSS}} \leq MTTF_{IC} \leq \frac{1}{\lambda_{tISS}} \quad (34)$$

Assim como se a variável x for a distância, pode-se entender que o intervalo para o MDTF nesse caso é:

$$\frac{1}{\lambda_{dSSS}} \leq MDTF_{IC} \leq \frac{1}{\lambda_{dISS}} \quad (35)$$

O Apêndice A contém a tabela da distribuição qui-quadrado para vários valores φ e α , servindo como auxílio para a solução das equações (28), (29), (32) e (33).

Percebe-se que a forma de se obter o intervalo de confiança para testes com substituição e sem substituição são muito parecidos, apresentando diferenças bem sutis, por isso é necessário ter uma atenção especial com essas diferenças para se evitar erros.

4 CARACTERÍSTICAS DA FERRAMENTA DESENVOLVIDA

As análises que serão apresentadas no capítulo 5 exigiram o desenvolvimento de uma ferramenta que fosse possível empregar os métodos apresentados no capítulo 3. A ferramenta foi desenvolvida toda dentro do ambiente de trabalho do Microsoft Excel, sendo que a sua utilização é feita dentro do próprio ambiente de trabalho oferecido pelo software.

A planilha desenvolvida é denominada de Ferramenta de Análise da Confiabilidade de Componentes (FACC), ela apresenta 6 abas, sendo que as entradas de informações e dados são feitas em 3 delas, outras 2 são responsáveis pelos cálculos e processamento das informações e a última apresenta os resultados gerados.

4.1 VISÃO INICIAL DA FERRAMENTA E SUA UTILIZAÇÃO

O primeiro ponto a ser observado pelo usuário da ferramenta é que toda e qualquer ação que o usuário deve fazer nas células da planilha é feita nas que estão pintadas em amarelo, as células em outras cores ou fazem parte da estrutura das tabelas ou são células onde são realizados os cálculos e análises automaticamente, portanto, elas podem conter fórmulas. Outro ponto que deve ser observado é que caso o usuário queira lançar dados copiados de outra fonte ou da própria planilha, ele deve colar no formato de “Valores”, opção fornecida pelo Microsoft Excel. Para isso, basta apenas que o usuário aperte o botão esquerdo do mouse e escolha a opção “Colar Especial” e então selecionar o formato “Valores”, isso evita perder a formatação da planilha. Se o usuário desrespeitar essas regras, a planilha pode não funcionar corretamente.

A organização das 6 abas da planilha está na mesma ordem de utilização que o usuário deve seguir, a primeira aba que o usuário se depara é a “Entrada Informações”. Nela são colocadas as informações sobre a frota de trens em que o componente a ser analisado está inserido, as informações operacionais sobre essa mesma frota, as informações sobre o componente em análise e as informações sobre a análise a ser feita.

A Figura 16 mostra a aba “Entrada Informações”, na coluna B dessa aba são inseridos os códigos dos trens da frota que será analisada, é importante o usuário colocar o mesmo código utilizado no banco de dados das falhas, para que a planilha funcione corretamente. Na coluna C deve-se colocar a data que cada um dos trens entrou em operação na sua respectiva linha, no exemplo da Figura 16, o trem com código “TUE 212” entrou em operação no dia 23/05/2009, por exemplo. Na célula H3 o usuário deve colocar o tempo médio que os trens operam por dia, no exemplo da Figura 16 o tempo médio foi de 20 horas. Na célula H7 deve-se colocar quantos

componentes por trem existem para o componente que será analisado, no exemplo da Figura 16 existiam 4 componentes por trem. Na célula H10 o usuário deve selecionar qual unidade vai querer que as análises sejam feitas, horas ou quilômetros, no exemplo da Figura 16 selecionou-se horas. Na célula H11 é colocado o nível de confiança para as análises por intervalo de confiança (discussão presente nas seções 2.7 e 3.2) e na célula H12 o usuário deve colocar até que dia a frota foi monitorada, ou seja, a data do fim do período de observação da frota, no exemplo da Figura 16 foi utilizado 95,00% de nível de confiança e a frota foi monitorada até 31/01/2012. Todas as outras células da aba “Entrada Informações” realizam suas funções automaticamente.

Figura 16 - Aba “Entrada Informações” da FACC

Informações Sobre a Frota de Trens que Contém o Componente			
Código do Trem	Início de Operação	Quilometragem Acumulada	Tempo Acumulado
TUE 212	23/05/2009	351.360	19.660
TUE 213	28/03/2009	351.461	20.780
TUE 214	11/05/2009	312.393	19.900
TUE 215	30/04/2009	366.273	20.120
TUE 216	19/06/2009	350.540	19.120
TUE 217	14/09/2009	334.376	17.380
TUE 218	02/11/2009	313.051	16.400
TUE 219	09/11/2009	328.141	16.260
TUE 220	11/12/2009	299.062	15.620
TUE 221	22/12/2009	274.686	15.400
TUE 222	16/01/2010	244.394	14.900
TUE 223	10/03/2010	270.570	13.840
TUE 224	19/03/2010	265.898	13.660
TUE 225	23/03/2010	257.572	13.580
TUE 226	25/04/2010	260.106	12.920
TUE 227	20/05/2010	234.663	12.420

Informações Operacionais	
Tempo de Operação Diário	20
Número de Trens em Operação	16

Informações Sobre o Componente	
Número de Componentes por Trem	4

Informações das Análises	
Unidade de Análise	horas
Nível de Confiança	95,00%
Fim da Censura	31/01/2012

Fonte: produção do próprio autor

A Figura 17 mostra a aba “Entrada Quilometragem”, nela o usuário deve entrar com a quantidade de quilômetros que cada trem da frota em análise rodou em cada mês de observação. Na coluna A dessa aba a ferramenta busca automaticamente o código de cada trem da frota conforme as informações que o usuário inseriu na aba “Entrada Informações”, para o exemplo da Figura 17 o primeiro código achado foi “TUE 212”. Na linha 1 estão os meses em que a frota foi observada, enumerados de 1 até 100, mas não necessariamente a frota deve ser analisada por 100 meses, a numeração até 100 significa que se pode lançar dados de 100 meses de observação, no exemplo em questão a frota foi observada por 35 meses. Com isso, forma-se uma matriz, em amarelo, que o usuário deve lançar a quantidade de quilômetros rodados por

cada trem em cada mês de observação na sua respectiva célula, o usuário deve lançar essas informações até o último mês em que a frota foi analisada. Por exemplo, se a frota foi observada por 35 meses deve-se então lançar a quilometragem rodada em cada um desses 35 meses e para cada um dos trens da frota. Portanto, na coluna B serão lançados os números de quilômetros rodados por trem para o primeiro mês, na coluna C para o segundo, na coluna D para o terceiro e assim por diante. O usuário pode deixar sem preencher as células que não contemplam a frota e nem quantidade de meses em que a frota foi observada. É importante ressaltar que se não for preenchido corretamente ou então não se preencher por completo as informações necessárias (quilômetros para cada trem em cada mês de observação), a análise do componente na unidade de quilômetros fica prejudicada e apresenta resultados não condizentes com a realidade, podendo o componente ser analisado apenas na unidade de horas.

Figura 17 - Aba “Entrada Quilometragem” da FACC

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	TUE 212	0	0	2.820	10.577	22.842	11.689	10.242	14.142	6.474	14.147	12.680	10.252	3.708	11.218	0
3	TUE 213	960	9.596	9.916	9.596	8.447	12.378	4.447	15.075	13.643	8.757	10.434	13.380	10.246	871	7.927
4	TUE 214	0	0	7.245	10.867	8.574	10.557	9.610	10.445	9.712	0	0	0	0	7.404	13.95
5	TUE 215	0	0	11.805	11.424	7.860	9.957	10.791	10.376	6.012	10.913	12.956	13.783	13.985	0	11.71
6	TUE 216	0	0	0	1.355	6.100	11.713	12.404	11.917	10.323	11.989	10.711	11.396	15.037	6.108	69
7	TUE 217	0	0	0	0	1.298	0	5.398	14.395	15.343	14.112	14.813	10.893	11.536	8.437	4.477
8	TUE 218	0	0	0	0	0	0	0	0	6.058	10.777	15.234	15.124	15.122	12.861	199
9	TUE 219	0	0	0	0	0	0	0	0	7.916	14.370	13.546	13.787	15.353	16.435	12.54
10	TUE 220	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.574	14.409	12.515	14.629	13.857	14.46
11	TUE 221	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	9.643	8.772	3.738	8.961	10.88
12	TUE 222	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.274	10.254	12.142	12.142	14.64
13	TUE 223	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.125	12.479	14.24
14	TUE 224	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.211	12.735	14.45
15	TUE 225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.107	12.837	13.40
16	TUE 226	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	898	14.08
17	TUE 227	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18																
19																
20																
21																
22																

Fonte: produção do próprio autor

Na aba “Entrada Falhas”, mostrada na Figura 18, o usuário lança as informações sobre as falhas, cada uma em uma linha, em qualquer ordem, já que a ferramenta é capaz de se organizar para cumprir as exigências da técnica descrita na seção 3.1. Uma frota de trens pode conter várias unidades, cada uma dessas unidades tem uma certa quantidade de carros (erroneamente chamados de vagões no jargão popular), geralmente essa quantidade de carros é igual para todas as unidades da frota. Por isso, para identificar qual componente ocorreu a falha, deve-se preencher a coluna C da aba “Entrada Falhas” com o código do trem, na coluna D com o código

do carro e na coluna E com o código do componente em que ocorreu a falha. Caso não consiga cumprir as exigências para o preenchimento dos códigos por limitação dos dados, não é possível efetuar as análises em populações que houve trocas de componentes durante o período de observação. Isso deve ao fato de se perder a rastreabilidade do componente novo que entra em operação, após a falha de outro componente do mesmo tipo, dessa forma as análises ficariam prejudicadas e apresentariam resultados errados.

Ainda sobre a aba “Entrada Falhas”, na coluna F o usuário insere a data que cada falha ocorreu e na coluna G a data em que o trem voltou a operar, caso ele tenha sido retirado de operação por conta dessa falha. Se a coluna G não for preenchida, a planilha reconhece que o trem retornou ao serviço no mesmo dia em que ocorreu a falha, o que na prática não altera significativamente o resultado final, já que os reparos costumam ser realizados de forma rápida no setor ferroviário. As colunas H e I são colunas de apoio no qual o usuário insere o problema identificado em cada falha e o tipo de intervenção que isso acarretou, respectivamente, o preenchimento delas não é obrigatório, sua função é apenas para que o usuário tenha condições de avaliar se aquilo foi uma falha ou não. Na coluna J o usuário pode aceitar ou não a falha que está em cada linha, sendo que cada uma das linhas tem uma caixa de seleção que quando está ticada aceita a falha daquela linha como verdadeira e quando não está ticada a reconhece como falsa.

No exemplo da Figura 18, a primeira falha lançada, por exemplo, ocorreu no “TUE 222”, carro “1356”, no componente de código “03.03.01” em 20/07/2010 e a data de retorno ao serviço também foi no mesmo dia da ocorrência da falha. O problema identificado para essa falha é descrito no banco de dados como “farol baixo lado esquerdo não acende” e a intervenção como “substituída lâmpada, farol testado, ok”, por fim, a falha foi aceita como verdadeira pelo usuário.

Figura 18 - Aba “Entrada Falhas” da FACC (1)

Informações Sobre as Falhas do Componente									
nº da Falha	Trem	Carro	Código	Data da Falha	Data da Ret. ao Serv.	Problema Identificado	Tipo de Intervenção	Falha	D
1	TUE 222	1356	03.03.01	20/07/2010	20/07/2010	FAROL BAIXO LADO ESQUERDO NÃO ACENDE	SUBSTITUIDA LAMPADA FAROL TESTADO OK	✓	
2	TUE 220	1349	03.03.02	07/08/2010	09/08/2010	FAROL LADO DIREITO APAGADO	SUBSTITUIDO	✓	
3	TUE 220	1344	03.03.02	20/08/2010	20/08/2010	CARRO 1 FAROL DIREITO APAGADO	SUBSTITUIDO	✓	
4	TUE 227	1386	03.03.02	23/02/2011	23/02/2011	COMANDO NORTE 2 FAROIS APAGADOS	SUBSTITUÍDA AS LÂMPADAS	✓	
5	TUE 227	1386	03.03.01	24/02/2011	24/02/2011	FAROL FRACO NOS 2 LADOS APAGADOS	SUBSTITUÍDA AS LÂMPADAS	✓	
6	TUE 223	1362	03.03.01	30/11/2010	15/12/2010	FAROL BAIXO INOPERANTE	SUBSTITUIDO	✓	
7	TUE 223	1367	03.03.01	21/12/2010	23/12/2010	COMANDO SUL FAROL BAIXO APAGADO.	SUBSTITUIDO	✓	
8	TUE 222	1361	03.03.02	27/11/2010	10/12/2010	COMANDO SUL FAROL LADO DIREITO APAGADO	SUBSTITUIDO	✓	
9	TUE 225	1374	03.03.01	27/01/2011	27/01/2011	COMANDO NORTE FAROL APAGADO.	SUBSTITUIDO	✓	
10	TUE 220	1344	03.03.01	04/10/2010	09/10/2010	FAROL BAIXO INOPERANTE	SUBSTITUIDO	✓	
11	TUE 220	1344	03.03.01	09/10/2010	09/10/2010	COMANDO NORTE FAROL LADO ESQUERDO APAGADO	SUBSTITUIDO	✓	
12	TUE 224	1373	03.03.02	22/02/2011	22/02/2011	FAROL LADO DIREITO APAGADO	SUBSTITUÍDA A LÂMPADA	✓	
13	TUE 221	1355	03.03.02	27/11/2010	10/12/2010	COMANDO SUL FAROL LADO DIREITO APAGADO	SUBSTITUIDO	✓	
14	TUE 224	1368	03.03.02	24/03/2011	24/03/2011	COMANDO NORTE FAROL DIREITO APAGADO	SUBSTITUIDO	✓	
15	TUE 222	1361	03.03.01	08/02/2011	08/02/2011	COMANDO SUL FAROL BAIXO LADO ESQUERDO APAGADO	SUBSTITUÍDA A LÂMPADA DO FAROL	✓	
16	TUE 221	1350	03.03.01	16/01/2011	19/01/2011	FAROL FRACO LADO ESQUERDO NÃO ACENDE	SUBSTITUIDO	✓	
17	TUE 225	1379	03.03.01	22/04/2011	22/04/2011	FAROL LADO ESQUERDO APAGADO	SUBSTITUIDO	✓	
18	TUE 221	1355	03.03.01	19/02/2011	19/02/2011	FAROL APAGADO LADO ESQUERDO	SUBSTITUÍDA A LÂMPADA	✓	
19	TUE 221	1350	03.03.02	23/02/2011	23/02/2011	COMANDO NORTE FAROL DIREITO ALTO/BAIXO APAGADO	SUBSTITUÍDA A LÂMPADA	✓	
20	TUE 223	1367	03.03.01	20/05/2011	22/05/2011	FAROL BAIXO LADO ESQUERDO NÃO ACENDE	SUBSTITUIDO	✓	
21	TUE 215	1314	03.03.02	21/08/2010	21/08/2010	FAROL FRACO LADO DIREITO NÃO ACENDE	SUBSTITUIDO	✓	
22	TUE 225	1379	03.03.02	29/06/2011	29/06/2011	FAROL LADO DIREITO APAGADO	SUBSTITUIDO	✓	
23	TUE 226	1380	03.03.01	12/08/2011	12/08/2011	COMANDO NORTE FAROL BAIXO APAGADO	SUBSTITUIDO	✓	
24	TUE 220	1349	03.03.01	19/04/2011	20/04/2011	CARRO 6 LÂMPADA DO FAROL LADO ESQUERDO APAGADA	SUBSTITUIDO	✓	
25	TUE 222	1356	03.03.02	12/07/2011	12/07/2011	CARRO 1 FAROL BAIXO LADO C NÃO ACENDE	SUBSTITUIDO	✓	
26	TUE 227	1386	03.03.02	09/11/2011	11/11/2011	COMANDO NORTE FAROL BAIXO LADO DIREITO NÃO ACENDE	FAROL BAIXO INOPERANTE, FOI SUBSTITUÍDO	✓	
27	TUE 215	1319	03.03.01	18/11/2010	20/11/2010	COMANDO SUL FAROL BAIXO LADO ESQUERDO APAGADO	SUBSTITUIDO	✓	
28	TUE 224	1373	03.03.02	25/09/2011	27/09/2011	FAROL DIREITO BAIXO NÃO ACENDE	SUBSTITUIDO	✓	
29	TUE 223	1362	03.03.01	10/09/2011	13/09/2011	FAROL NORTE E FRACO LADO ESQUERDO NÃO ACENDE	SUBSTITUIDO	✓	

Fonte: produção do próprio autor

As colunas de K a R da aba “Entrada Falhas” são automáticas, elas servem para calcular o tempo e a distância que cada falha demorou para acontecer, ainda existem algumas colunas ocultas (de T a AA) das quais a planilha usa como base para o processamento das informações, a Figura 19 mostra essa segunda parte da planilha.

Figura 19 - Aba “Entrada Falhas” da FACC (2)

Falha	Data da Ret. ao Serv.	Data do Último Ret. ao Serviço	Início da Operação do Item	Quilometragem no Início	Quilometragem na Falha	Quilômetros para Falhar	Dias para Falhar	Horas para Falhar
✓	20/07/2010		16/01/2010	0	54.927	54.927	185	3.700
✓	09/08/2010		11/12/2009	0	83.817	83.817	239	4.780
✓	20/08/2010		11/12/2009	0	89.536	89.536	252	5.040
✓	23/02/2011		20/05/2010	0	91.966	91.966	279	5.580
✓	24/02/2011		20/05/2010	0	92.224	92.224	280	5.600
✓	15/12/2010		10/03/2010	0	85.971	85.971	265	5.300
✓	23/12/2010		10/03/2010	0	92.202	92.202	286	5.720
✓	10/12/2010		16/01/2010	0	72.057	72.057	315	6.300
✓	27/01/2011		23/09/2010	0	104.126	104.126	310	6.200
✓	09/10/2010		11/12/2009	0	109.045	109.045	297	5.940
✓	22/02/2011		19/03/2010	0	116.637	116.637	340	6.800
✓	10/12/2010		22/12/2009	0	92.071	92.071	340	6.800
✓	24/03/2011		19/03/2010	0	126.761	126.761	370	7.400
✓	08/02/2011		16/01/2010	0	91.584	91.584	388	7.760
✓	19/01/2011		22/12/2009	0	114.623	114.623	390	7.800
✓	22/04/2011		23/03/2010	0	134.146	134.146	395	7.900
✓	19/02/2011		22/12/2009	0	130.064	130.064	424	8.480
✓	23/02/2011		22/12/2009	0	131.486	131.486	428	8.560
✓	22/05/2011	23/12/2010	23/12/2010	93.325	150.898	57.573	147	2.946
✓	21/08/2010		30/04/2009	0	143.850	143.850	478	9.560
✓	29/06/2011		23/03/2010	0	162.750	162.750	463	9.260
✓	12/08/2011		25/04/2010	0	178.231	178.231	474	9.480
✓	20/04/2011		11/12/2009	0	164.017	164.017	494	9.880
✓	12/07/2011		16/01/2010	0	151.061	151.061	542	10.840
✓	11/11/2011	23/02/2011	23/02/2011	92.199	196.414	104.216	258	5.162
✓	20/11/2010		30/04/2009	0	177.584	177.584	567	11.340
✓	27/09/2011	22/02/2011	22/02/2011	116.901	203.686	86.785	214	4.282
✓	13/09/2011	15/12/2010	15/12/2010	90.380	199.185	108.794	268	5.361

Fonte: produção do próprio autor

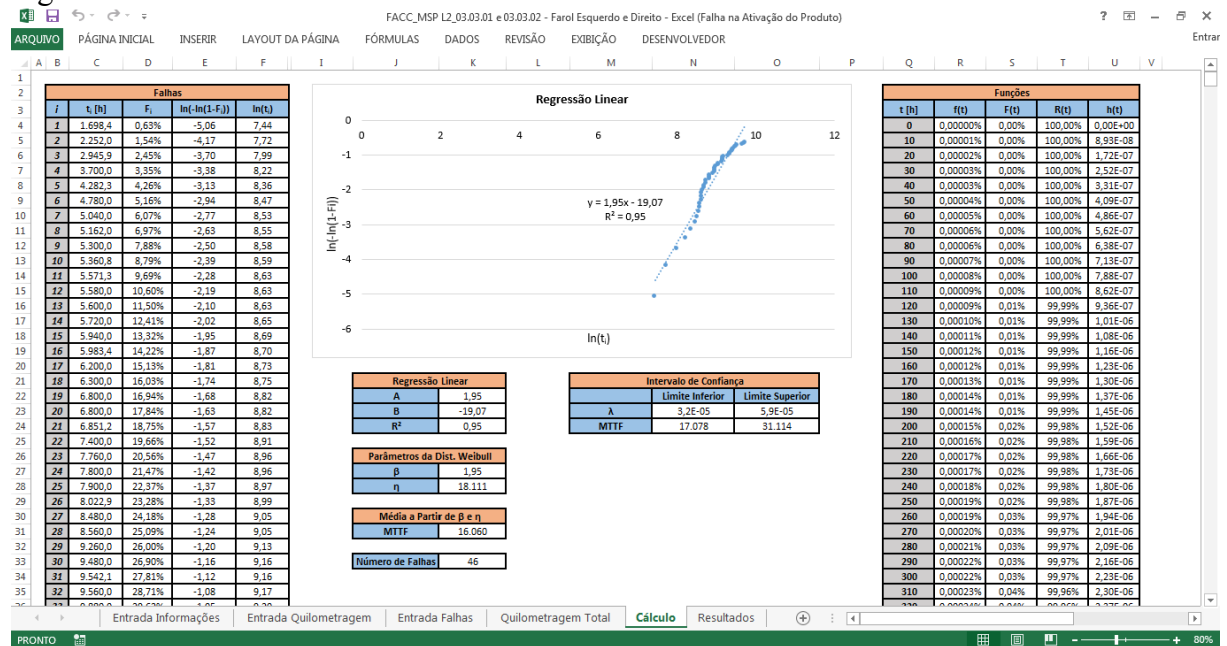
As abas subsequentes são automáticas e não precisam de preenchimento nenhum. Na aba “Quilometragem Total” é realizado o cálculo da quilometragem acumulada de cada trem da frota durante o período de observação, ela apresenta o mesmo formato da aba “Entrada Quilometragem”, mostrada na Figura 17.

Já a aba “Cálculo”, mostrada na Figura 20, a planilha aplica todas as técnicas apresentadas nas seções 3.1 e 3.2 de acordo com as informações inseridas pelo usuário nas abas anteriores. As colunas de B a F são as responsáveis por calcular os percentuais acumulados de falhas F_i e realizar os cálculos que geram os pontos da regressão linear para então estimar os valores de β e η da distribuição de Weibull (discussão presente na seção 3.1), sendo eles apresentados nas células K27 e K28, respectivamente. Já os parâmetros A , B e R^2 da regressão linear estão presentes nas células K22, K23 e K24, respectivamente. Nas colunas de Q a U são calculadas as funções $f(x)$, $F(x)$, $R(x)$ e $h(x)$ a partir dos valores de β e η estimados. Na tabela M21:O24 são realizados os cálculos do intervalo de confiança para o λ_x e o MTTF/MDTF, conforme as técnicas apresentadas na seção 3.2.

A aba “Cálculo” ainda realiza o cálculo do MTTF/MDTF na célula K31, a partir dos valores de β e η , utilizando a equação (21). Além disso, é apresentado a quantidade de falhas observadas para o componente, na célula K34, a partir das informações lançadas pelo usuário na aba “Entrada Falhas”. A aba “Cálculo” também apresenta um gráfico com a regressão linear realizada, e o parâmetro R^2 são importantes para se identificar os pontos que estão fora do padrão (longe da reta média da regressão), sendo esses pontos chamados de *ouliers* pela IEC 61649 (2008), esses pontos devem ser investigados com cuidado para verificar se realmente são falhas, devendo o usuário verificar a qual falha esse ponto se refere e então analisar a sua veracidade.

Todos os cálculos da aba “Cálculos” se adequam de acordo com a unidade de análise escolhida pelo usuário na aba “Entrada Informações” automaticamente.

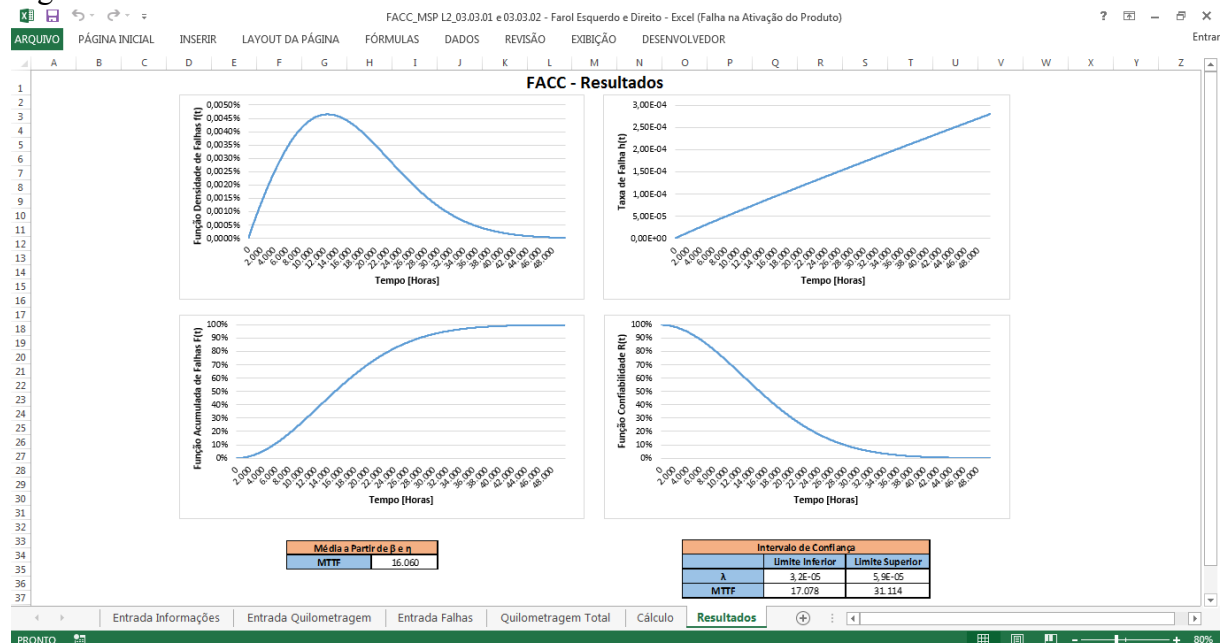
Figura 20 - Aba “Cálculo” da FACC



Fonte: produção do próprio autor

Na aba “Resultados”, mostrada na Figura 21, são apresentados os gráficos das funções $f(x)$, $F(x)$, $R(x)$ e $h(x)$, além do intervalo de confiança e o MTTF/MDTF calculado a partir dos parâmetros β e η .

Figura 21 - Aba “Resultados” da FACC



Fonte: produção do próprio autor

É importante destacar que apesar da ferramenta ter um funcionamento fácil e de certa forma automático, cabe ao usuário analisar e interpretar os resultados gerados, verificando a qualidade dos dados de entrada e adequando-os conforme a necessidade. Por exemplo, na eliminação de falhas falsas que podem ser identificadas a partir de *outliers* ou por meio da descrição de cada falha.

5 RESULTADOS OBTIDOS COM A FERRAMENTA DESENVOLVIDA

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos para três componentes de diferentes tipos de uma frota de trens composta por 16 unidades que rodam no sistema metroviário de São Paulo - SP, através da ferramenta apresentada no capítulo 4. Os três componentes analisados são os Faróis Frontais dos Carros-Cabine (componentes indicados pelas setas verdes na Figura 22), as Palhetas dos Para-Brisas (componente indicado pela seta vermelha na Figura 22) e os Ejetores de Água dos Para-Brisas (componentes indicados pelas setas amarelas na Figura 22). Para as seções 5.1 e 5.2 a metodologia de análise utilizada é a apresentada na seção 3.1, já para a seção 5.3 a metodologia utilizada é a apresentada na seção 3.2.

Figura 22 - Unidade da Frota (TUE 214) com os Componentes Analisados



Fonte: adaptado de RMTS (2016)

O período de observação para essa frota foi da data de início de operação comercial da primeira unidade entregue ao cliente, 28/03/2009, até o dia 31/01/2012. Os dados são provenientes do banco de dados do fornecedor, sendo eles um resultado do alinhamento feito entre o operador (cliente) e o fabricante (fornecedor) dos trens durante o período de demonstração da confiabilidade (discussão presente na seção 1.3).

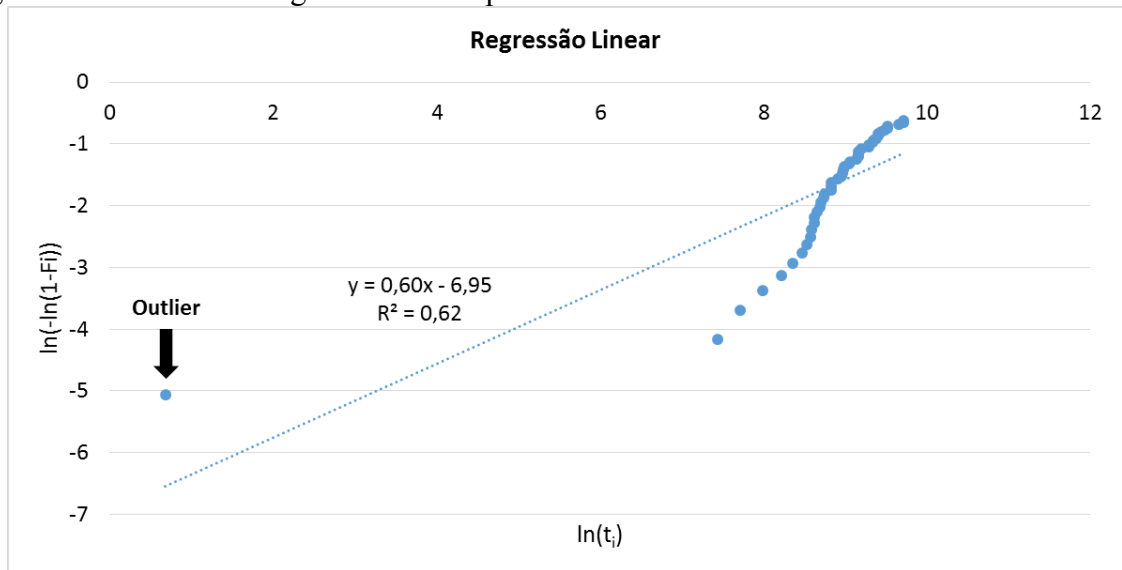
O tempo médio de operação dos trens foi considerado como 20 horas, valor retirado de Boroski (2008), documento no qual o fornecedor apresenta as principais características de operação da frota em análise. As quilometragens mensais que cada trem rodou no período de observação são provenientes de medições feitas pelo cliente durante a operação da frota.

5.1 ANÁLISE DOS FARÓIS FRONTAIS DOS CARROS-CABINE

Cada trem da frota em análise contém dois faróis frontais por carro-cabine (carros ao extremo do trem onde se encontram as cabines de comando do trem), sendo eles usados para iluminação da via e para a sinalização do trem. Um carro-cabine com os faróis frontais ligados indica que essa cabine está no comando e que o trem se movimenta no sentido dela. Como cada trem tem dois carros-cabines e a frota é composta por 16 unidades, o total de componentes desse tipo instalados nos trens é de 64 unidades. Entretanto, observando o banco de dados das falhas para esse componente (Anexo A), é possível verificar que houve 47 falhas com substituição, mas uma dessas falhas foi considerada falsa, ou seja, na verdade houve 46 falhas para os faróis frontais. Portanto, somando-se os 46 novos componentes que entraram em operação, para substituir os que falharam, aos 64 componentes já calculados, chega-se ao total de 110 faróis observados.

A primeira análise para o componente, feita através dos dados sobre as falhas e da ferramenta apresentada no capítulo 4, utilizando a unidade de horas, apresentou dois pontos referentes a falhas que foram considerados como *outliers*. Um desses pontos chegou a apresentar um tempo para a falha negativo, indicando um problema no preenchimento do banco de dados. Uma investigação desse ponto mostrou que o problema foi causado porque lançaram uma mesma falha duas vezes, sendo que o *outlier* foi a última delas a ser lançada, portanto, essa falha foi considerada como falsa. Após a eliminação dessa falha ainda restou o segundo *outlier*, na Figura 23 esse ponto é indicado pela seta, por conta desse *outlier* o R^2 estava com um valor de 0,62, evidenciando que a falha que gerou esse ponto apresentava alguma incoerência.

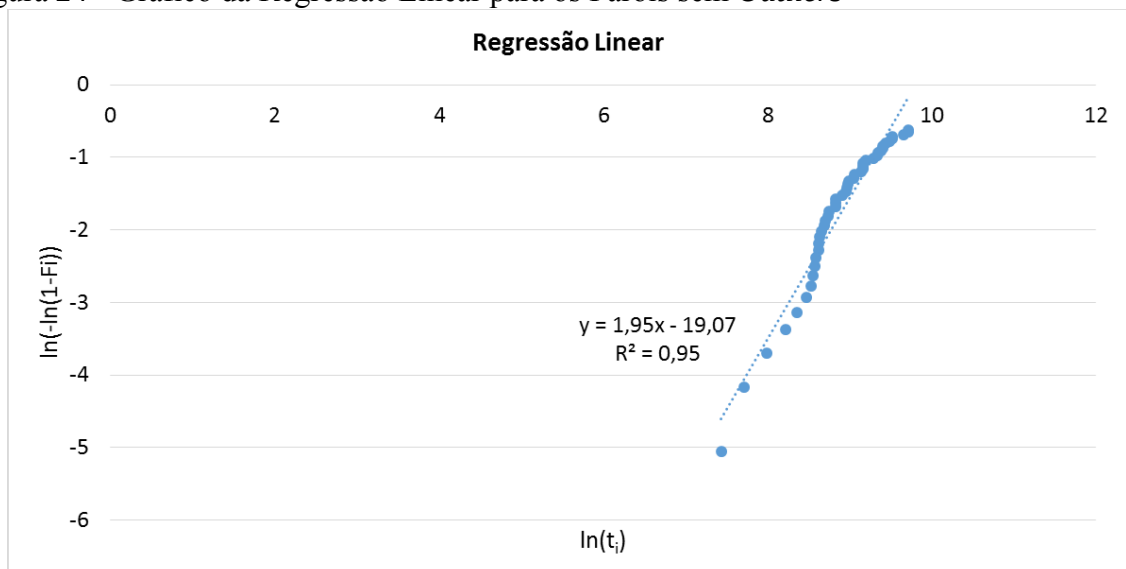
Figura 23 - Gráfico da Regressão Linear para os Faróis com *Outlier*



Fonte: produção do próprio autor

Uma investigação das falhas lançadas no banco de dados indicou que o problema também se tratava de erro de preenchimento, de forma que a descrição da falha dizia que os dois faróis frontais do carro “1386” da unidade “TUE 227” não acendiam. A falha anterior a essa apresentava a mesma justificativa para o mesmo carro e mesma unidade, sendo que havia ocorrido um dia antes, entretanto, ambas as falhas estavam referenciadas para o farol direito. Ou seja, ao invés de lançarem uma falha para cada um dos faróis, foram lançadas duas falhas para o mesmo farol, fazendo com que a ferramenta reconhecesse um tempo para a falha de um dia para a segunda ocorrência.

Figura 24 - Gráfico da Regressão Linear para os Faróis sem *Outliers*



Fonte: produção do próprio autor

O problema foi corrigido trocando-se o código de uma das falhas para o do farol esquerdo, a Figura 24 mostra o novo gráfico com o *outlier* corrigido, sendo possível perceber que houve uma significativa melhora no R^2 , que passou de 0,62 para 0,95. Com as correções realizadas nos dados pode-se ter uma maior segurança nos resultados subsequentes.

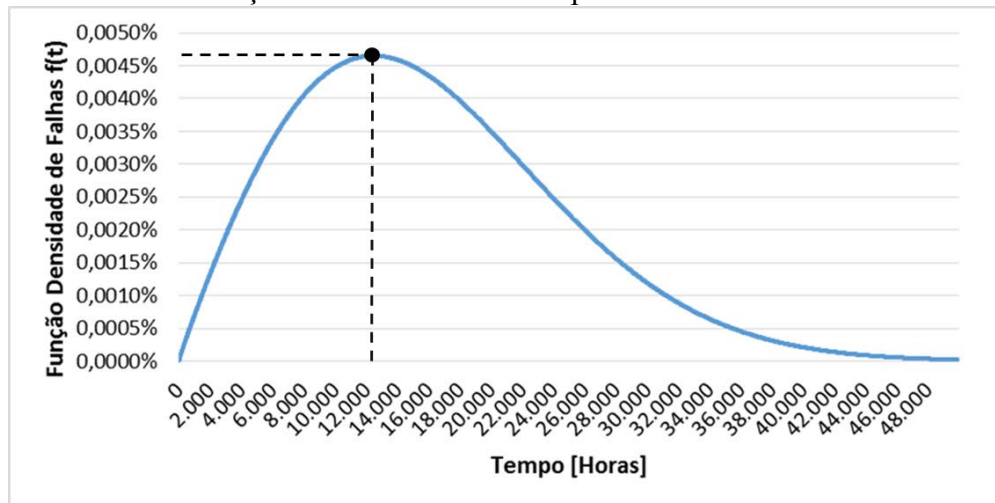
A partir dos resultados da regressão linear realizada para os pontos plotados no gráfico da Figura 24 e por meio das equações (23) e (24) chega-se aos valores de $\beta = 1,95$ e $\eta = 18.111$ h para os parâmetros da distribuição de Weibull do componente, as equações (36) e (37) mostram os cálculos realizados.

$$\beta = A = 1,95 \quad (36)$$

$$\eta = e^{-B/A} = e^{-(-19,07)/1,95} = 18.111 \text{ h} \quad (37)$$

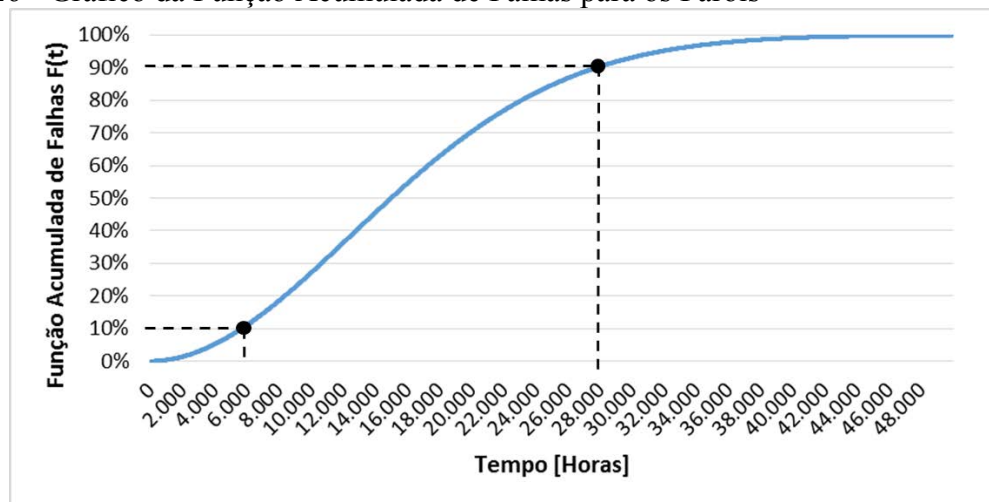
Com isso, foram gerados os gráficos de $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ e $h(t)$ para o componente em análise, mostrados nas Figuras 25, 26, 27 e 28, respectivamente.

Figura 25 - Gráfico da Função Densidade de Falhas para os Faróis



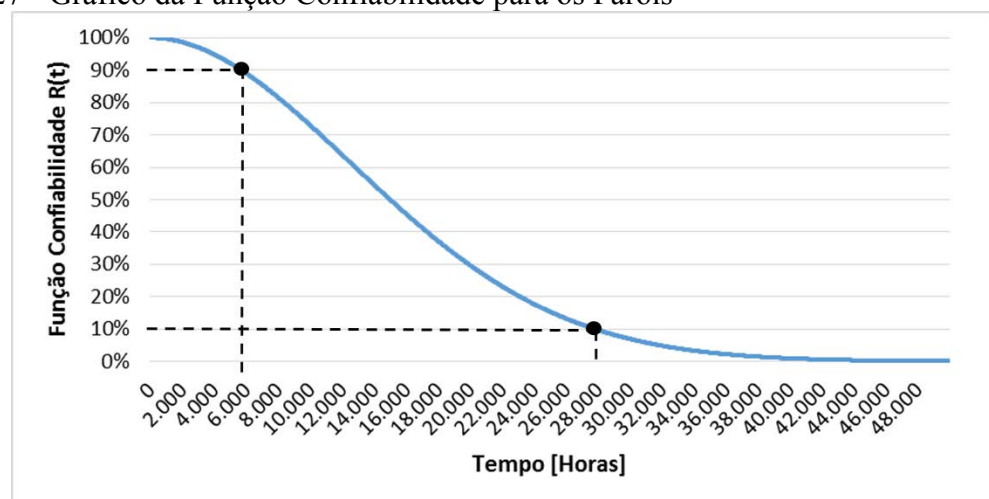
Fonte: produção do próprio autor

Figura 26 - Gráfico da Função Acumulada de Falhas para os Faróis



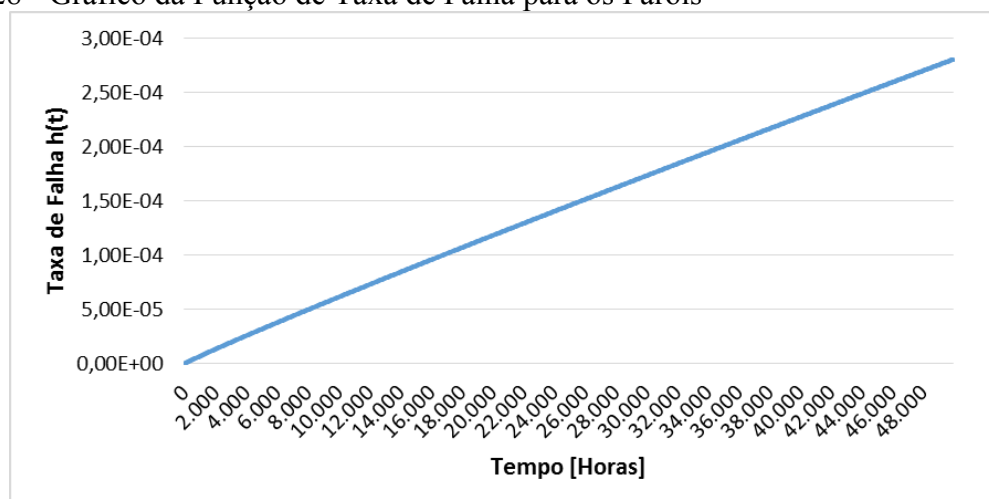
Fonte: produção do próprio autor

Figura 27 - Gráfico da Função Confiabilidade para os Faróis



Fonte: produção do próprio autor

Figura 28 - Gráfico da Função de Taxa de Falha para os Faróis



Fonte: produção do próprio autor

A partir do gráfico da Figura 26, é possível ver que há um aumento muito intenso na função acumulada de falhas entre 6.000 e 28.000 horas de operação, passando de um valor de $F(t) = 10\%$ em 6.000 h para $F(t) = 90\%$ em 28.000 h, aproximadamente. Da mesma forma, no gráfico da Figura 27, a função confiabilidade $R(t)$ tem uma diminuição muito intensa para o mesmo período. Consequentemente, o gráfico da Figura 25 apresenta um aumento da função densidade de falhas no mesmo intervalo, atingindo o seu valor máximo em aproximadamente 12.500 horas de operação.

Consultando a Tabela 2, na seção 2.6, sabe-se que para os valores de $t_0 = 0$ e $\beta = 1,95$ o componente tem uma probabilidade de falha igual a 0 em $t = 0$, como pode ser visto no gráfico da Figura 26, e que a taxa de falha é crescente com o tempo, como pode ser visto no gráfico da Figura 28, de forma que o desgaste do componente inicia assim que ele entra em serviço, ou seja, em $t = 0$.

Observando gráfico da Figura 28, pode-se comprovar uma das premissas apresentadas na Tabela 1, de modo que o valor de $\beta = 1,95$ para o componente em análise é muito próximo do valor de $\beta = 2$, e segundo a Tabela 1, quando $\beta = 2$ a função de taxa de falha $h(t)$ tem um comportamento linearmente crescente.

As reflexões dos três parágrafos anteriores mostram que o componente está em desgaste durante todo o período de operação, sendo que esse desgaste ocorre com mais força no intervalo entre 6.000 e 28.000 horas de operação, tendo a sua maior intensidade em torno das 12.500 horas de operação, chegando ao ponto de que a confiabilidade nos faróis se reduz a menos de 10% após 28.000 horas de operação.

O MTTF para o componente com uma distribuição de Weibull de $t_0 = 0$, $\beta = 1,95$ e $\eta = 18.111$ h, utilizando a equação (21), é calculado da seguinte forma:

$$MTTF = t_0 + \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 18.111 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{1,95}\right) = 16.060 \text{ h} \quad (38)$$

O resultado de 16.060 horas de operação para o MTTF do componente é um valor dentro do período mais acentuado de desgaste do componente (6.000 a 28.000 horas de operação). Em termos de tempo corrido, a partir da consideração de que a frota opera cerca de 20 horas por dia, pode-se calcular que:

$$MTTF = \frac{16.060}{20} = 803 \text{ dias} \quad (39)$$

Ou seja, o componente apresenta um MTTF de aproximadamente 2 anos e 2 meses em tempo corrido para a frota em análise.

Para analisar o componente do ponto de vista tradicional (considerando que ele apresenta uma distribuição exponencial de probabilidade de falha ao longo do tempo), primeiro é montada a Tabela 5 para depois calcular o total de horas de operação acumuladas para o componente na frota inteira, e então pode-se utilizar a abordagem da seção 2.2 para calcular o MTTF. O total de horas acumuladas que cada trem operou é calculado multiplicando-se as 20 horas de operação diária e o total de dias acumulados de operação, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Total de Horas que Cada Trem Operou para o Período de Observação

Código do Trem	Início de Operação	Fim do Período de Observação	Total de Dias Acumulados	Total de Horas Acumuladas
TUE 212	23/05/2009	31/01/2012	983	19.660
TUE 213	28/03/2009	31/01/2012	1.039	20.780
TUE 214	11/05/2009	31/01/2012	995	19.900
TUE 215	30/04/2009	31/01/2012	1.006	20.120
TUE 216	19/06/2009	31/01/2012	956	19.120
TUE 217	14/09/2009	31/01/2012	869	17.380
TUE 218	02/11/2009	31/01/2012	820	16.400
TUE 219	09/11/2009	31/01/2012	813	16.260
TUE 220	11/12/2009	31/01/2012	781	15.620
TUE 221	22/12/2009	31/01/2012	770	15.400
TUE 222	16/01/2010	31/01/2012	745	14.900
TUE 223	10/03/2010	31/01/2012	692	13.840
TUE 224	19/03/2010	31/01/2012	683	13.660
TUE 225	23/03/2010	31/01/2012	679	13.580
TUE 226	25/04/2010	31/01/2012	646	12.920
TUE 227	20/05/2010	31/01/2012	621	12.420
Total Frota			13.098	261.960

Fonte: produção do próprio autor

Para calcular os T_{on} dos componentes que operaram durante o período de observação, considera-se que o T_{on} de cada componente é a própria quantidade de horas que o trem foi observado. Desse modo os T_{off} são desconsiderados da conta, o que não geraria alterações significativas no resultado final, já que os T_{off} são insignificantes em relação aos T_{on} . Por exemplo, se ocorressem duas falhas para o farol esquerdo de um dos carros do TUE 212, teria entrado em operação três componentes diferentes do mesmo tipo e no mesmo carro durante o período de observação. Consequentemente, o T_{on} para o farol esquerdo desse carro seria igual

ao total de horas que o trem operou, ou seja, 19.660 horas, segundo a Tabela 5, de forma que três componentes diferentes do mesmo tipo teriam contribuído para o resultado.

A partir da lógica do parágrafo anterior, pode-se calcular o acumulado de T_{on} da frota inteira apenas multiplicando-se o número de componentes por trem e o total de horas de operação da frota, que segundo a Tabela 5 foi de 261.960 h. Sabendo disso e que houve 46 falhas para esse tipo de componente na frota, durante o período de observação, e considerando que o componente apresenta uma distribuição exponencial de probabilidade de falha ao longo do tempo tem-se que:

$$MTTF = \frac{4 \times 261.960}{46} = 22.779 \text{ horas} \quad (40)$$

Utilizando a mesma abordagem da equação (39), chega-se a um MTTF de aproximadamente 3 anos e 1 mês para essa frota com o resultado da equação (40). Isso mostra que o MTTF calculado utilizando a abordagem tradicional, que considera o componente com uma distribuição exponencial de probabilidade de falha ao longo do tempo, apresenta uma diferença de 6.719 horas de operação para o MTTF calculado a partir da distribuição de Weibull, ou quase 1 ano em tempo corrido para a frota em análise. Ou seja, o MTTF do componente estaria sendo superestimado através da abordagem tradicional.

Utilizando a equação (4) e o resultado da equação (40), é possível achar um valor para a taxa de falha do componente, em falhas por hora, conforme a equação (41):

$$\lambda_t = \frac{1}{MTTF} = \frac{1}{22.779} = 4,4 \cdot 10^{-5} \text{ falhas/h} \quad (41)$$

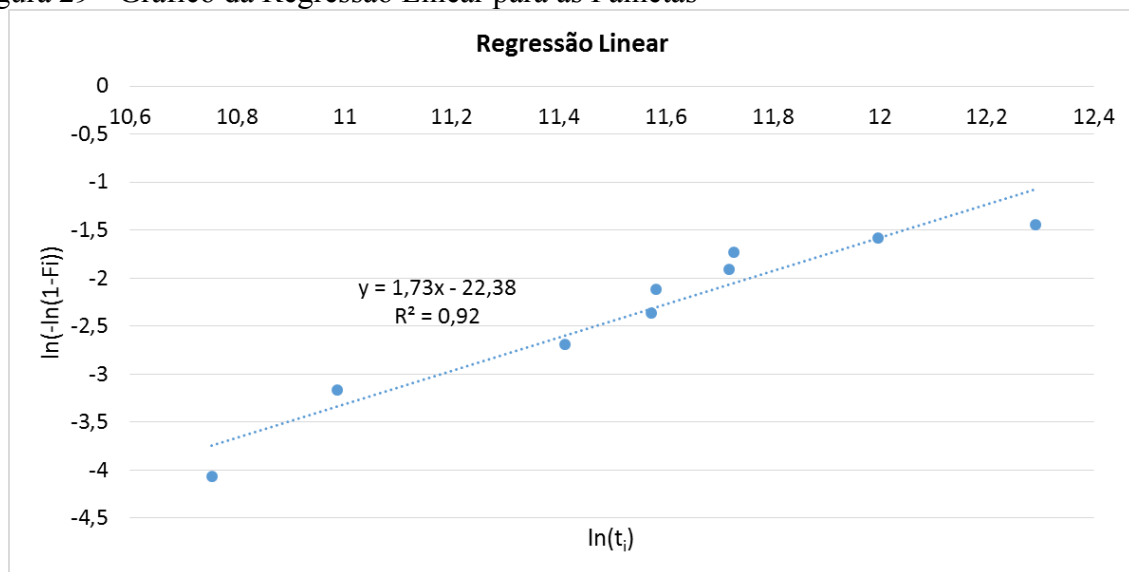
Entretanto, observando o gráfico Figura 28, percebe-se que na verdade a taxa de falha é uma função $h(t)$ crescente, diferente do resultado da equação (41) que apresenta um valor constante, já que adotou-se um modelo de distribuição exponencial para o componente. Isso mostra que esse tipo de abordagem para a taxa de falha se distancia mais da realidade, uma vez que no início da operação o componente deveria apresentar uma taxa de falha baixa que vai aumentando conforme o farol vai se desgastando.

5.2 ANÁLISE DAS PALHETAS DOS PARA-BRISAS

As palhetas dos para-brisas têm como função limpar o para-brisa para facilitar a visualização da via pelo condutor, assim como a de um carro. Cada carro-cabine apresenta uma palheta, como existem 16 trens na frota com dois carros-cabine cada um deles, o total de componentes desse tipo instalados nos trens é de 32 unidades. Foram verificadas 9 falhas que geraram substituição para esse componente, dessa forma soma-se os novos componentes que entraram em operação para substituir aqueles que falharam e chega-se a um total de 41 palhetas observadas.

Analisando o banco de dados sobre as falhas desse componente (Anexo B) e usando a ferramenta apresentada no capítulo 4, na unidade de quilômetros, não foram identificados *outliers*. O gráfico para a regressão linear dos pontos gerados com as falhas das palhetas encontra-se na Figura 29.

Figura 29 - Gráfico da Regressão Linear para as Palhetas



Fonte: produção do próprio autor

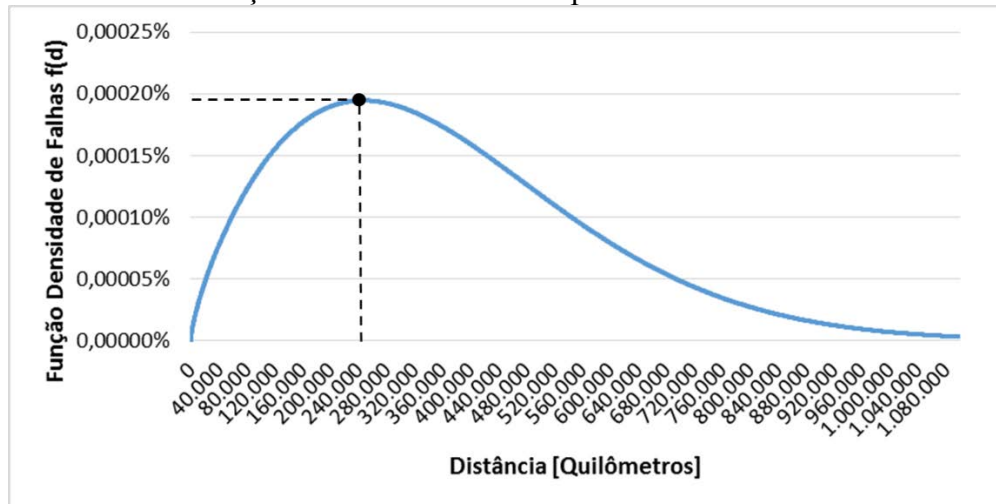
A partir dos resultados da regressão linear realizada para os pontos plotados no gráfico da Figura 29 e por meio das equações (23) e (24) chega-se aos valores de $\beta=1,73$ e $\eta = 405.545$ km para os parâmetros da distribuição de Weibull do componente, as equações (42) e (43) mostram os cálculos realizados.

$$\beta = A = 1,73 \quad (42)$$

$$\eta = e^{-B/A} = e^{-(-22,38)/1,73} = 405.545 \text{ km} \quad (43)$$

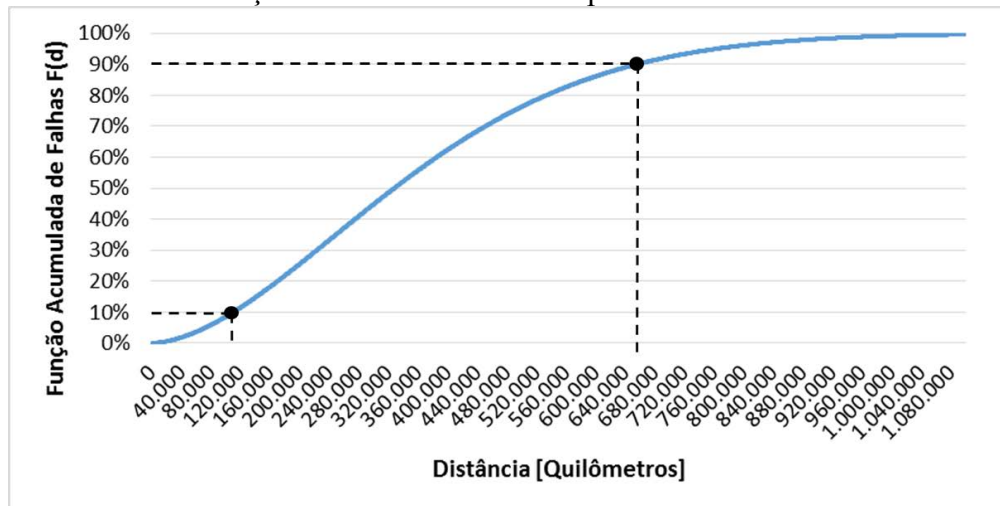
Com isso, foram gerados os gráficos de $f(d)$, $F(d)$, $R(d)$ e $h(d)$ para o componente em análise, mostrados nas Figuras 30, 31, 32 e 33, respectivamente.

Figura 30 - Gráfico da Função Densidade de Falhas para as Palhetas



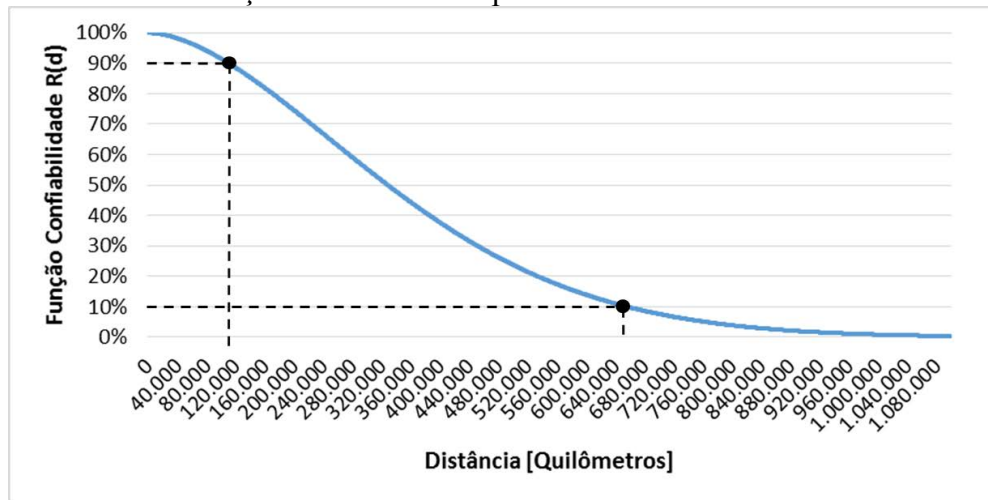
Fonte: produção do próprio autor

Figura 31 - Gráfico da Função Acumulada de Falhas para as Palhetas



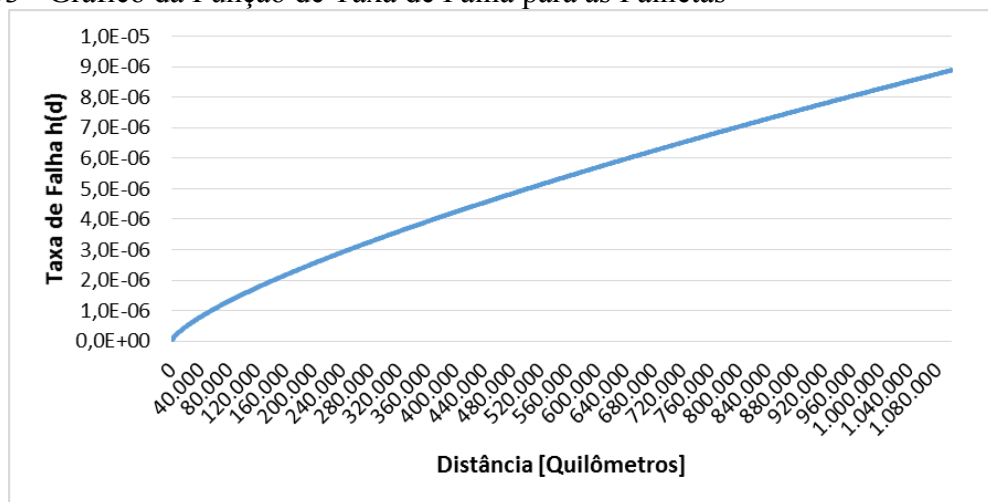
Fonte: produção do próprio autor

Figura 32 - Gráfico da Função Confiabilidade para as Palhetas



Fonte: produção do próprio autor

Figura 33 - Gráfico da Função de Taxa de Falha para as Palhetas



Fonte: produção do próprio autor

Assim como na seção 5.1, é possível verificar qual o intervalo de maior desgaste para o componente, só que dessa vez analisando do ponto de vista de quilometragem rodada. Verificando os gráficos das Figuras 31 e 32, vê-se que no intervalo de 110.000 a 650.000 km há um aumento intenso na $F(d)$, passando de $F(d) = 10\%$ em 110.000 km para $F(d) = 90\%$ em 650.000 km, aproximadamente. Logo, para o mesmo intervalo, a função confiabilidade passou de $R(d) = 90\%$ em 110.000 km para $R(d) = 10\%$ em 650.000 km, aproximadamente. Consequentemente, o gráfico da Figura 30 apresenta um aumento de $f(d)$ para o mesmo intervalo, atingindo o seu valor máximo em aproximadamente 250.000 km.

Esse componente tem uma probabilidade de falha igual a 0 em $d = 0$, como pode ser visto no gráfico da Figura 31, e a taxa de falha é crescente com o tempo, como pode ser visto no

gráfico da Figura 33, de forma que o desgaste do componente inicia assim que ele entra em serviço, pelas mesmas razões apresentadas na seção 5.1.

Portanto, as palhetas dos para-brisas estão em desgaste durante todo o período de operação, sendo que esse desgaste ocorre com mais força no intervalo entre 110.000 e 650.000 km, tendo a sua maior intensidade em torno dos 250.000 km.

O MDTF calculado para o componente com uma distribuição de Weibull de $d_0 = 0$, $\beta = 1,73$ e $\eta = 405.545$ km, utilizando a equação (21), resulta em 361.396 km, um valor dentro do período mais acentuado de desgaste do componente (110.000 a 650.000 km). A equação (44) mostra o cálculo realizado para o MDTF.

$$MDTF = d_0 + \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 405.545 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{1,73}\right) = 361.396 \text{ km} \quad (44)$$

Para calcular o MDTF do ponto de vista tradicional (considerando que ele apresenta uma distribuição exponencial de probabilidade de falha ao longo da distância percorrida), seguiu-se a mesma ideia que foi usada na seção 5.1. Com isso, montou-se a Tabela 6 para primeiro calcular o total de quilômetros acumulados pela frota, sendo que o total de quilômetros que cada trem acumulou durante o período de observação foi obtido a partir do banco de dados do fornecedor.

Tabela 6 - Total de Quilômetros que Cada Trem Rodou para o Período de Observação

Código do Trem	Total de Quilômetros Acumulados
TUE 212	351.360
TUE 213	351.461
TUE 214	312.393
TUE 215	366.273
TUE 216	350.540
TUE 217	334.376
TUE 218	313.051
TUE 219	328.141
TUE 220	299.062
TUE 221	274.686
TUE 222	244.394
TUE 223	270.570
TUE 224	265.898
TUE 225	257.572
TUE 226	260.106
TUE 227	234.663
Total Frota	4.814.546

Fonte: produção do próprio autor

Observando a Tabela 6, vê-se que o total de quilômetros acumulados pela frota durante o período de observação foi de 4.814.546 km, como cada unidade da frota tem duas palhetas e sabendo que houve 9 falhas para esse componente, pode-se calcular o MDTF pela abordagem tradicional de forma análoga a equação (40):

$$MDTF = \frac{2 \times 4.814.546}{9} = 1.069.899 \text{ km} \quad (45)$$

Ou seja, uma diferença de mais de 700.000 km para o MDTF calculado utilizando-se os parâmetros da distribuição de Weibull, além de apresentar um valor fora do período mais acentuado de desgaste do componente (110.000 a 650.000 km). Portanto, o MDTF das palhetas estaria sendo superestimado através da abordagem tradicional.

Utilizando a abordagem tradicional, é possível achar um valor para a taxa de falha do componente, em falhas por quilômetro, de forma análoga à equação (41):

$$\lambda_d = \frac{1}{MDTF} = \frac{1}{1.069.899} = 9,3 \cdot 10^{-7} \text{ falhas/km} \quad (46)$$

Da mesma forma que discutido na seção 5.1, quando se observa o gráfico da Figura 33, percebe-se que na verdade a taxa de falha é uma função $h(d)$ crescente, diferente do resultado constante da equação (46), já que adotou-se um modelo de distribuição exponencial para fazer esse cálculo. Mais uma vez pode-se perceber que a abordagem tradicional apresenta resultados que fogem da realidade do componente.

5.3 ANÁLISE DOS EJETORES DE ÁGUA DOS PARA-BRISAS

Os ejetores de água têm a função de auxiliar na limpeza dos para-brisas, o trem apresenta dois ejetores de água para cada para-brisa, como existe dois para-brisas por trem, um em cada carro-cabine, e a frota apresenta 16 unidades, chega-se ao total de 64 ejetores instalados na frota inteira. Verificou-se, no banco de dados desse componente (Anexo C), 14 falhas que geraram substituição, mas fazendo-se uma análise mais detalhada da descrição dessas falhas percebeu-se que existiam três falhas que se referenciavam a dois ejetores cada. Ou seja, descreveram a falha de dois ejetores como se fosse apenas uma, em três ocasiões diferentes, com isso, o

número de falhas foi de 17 no total. Portanto, o número total de ejetores observados foi de 81 unidades, sendo os 64 ejetores já calculados somados aos 17 novos componentes que entraram em operação para substituir os 17 que falharam.

Outra característica observada nas falhas é que a maior parte delas foram registradas nos dias 05/05/2010 e 04/04/2011. A hipótese mais provável para justificar esse fato é que deve ter havido uma verificação para esses componentes programada nesses dias, ou seja, as falhas ocorreram em outra data, mas só foram verificadas nos dias 05/05/2010 e 04/04/2011. Dessa forma, criou-se uma incerteza muito grande no tempo que cada componente demorou para falhar, isso gera uma insegurança para avaliar o componente utilizando a análise de Weibull, apresentada na seção 3.1. Por esse motivo, optou-se por se utilizar a técnica do intervalo de confiança apresentada na seção 3.2, através da ferramenta apresentada no capítulo 4.

Como houve substituição de componentes durante o período de observação, utilizou-se as equações (28) e (29) para gerar os resultados do intervalo de confiança da taxa de falha no tempo para os ejetores. Utilizando como base o resultado do acumulado de T_{on} para a frota inteira que foi de 261.960 h (calculado na Tabela 5) e a tabela do Apêndice A. Os limites inferior e superior do intervalo foram calculados da seguinte forma:

$$\lambda_{t_{ICS}} = \frac{\chi^2_{\alpha/2}(2 \cdot n)}{2 \cdot T^*} = \frac{\chi^2_{0,05/2}(2 \cdot 17)}{2 \cdot (4 \cdot 261.960)} = \frac{\chi^2_{0,025}(34)}{2.095.680} = \frac{19,806}{2.095.680} = 9,5 \cdot 10^{-6} \text{ falhas/h} \quad (47)$$

$$\lambda_{t_{SCS}} = \frac{\chi^2_{1-\alpha/2}(2 \cdot n + 2)}{2 \cdot T^*} = \frac{\chi^2_{1-0,05/2}(2 \cdot 17 + 2)}{2 \cdot (4 \cdot 261.960)} = \frac{\chi^2_{0,975}(36)}{2.095.680} = \frac{54,437}{2.095.680} = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ falhas/h} \quad (48)$$

A partir da equação (30) e com base nos resultados das equações (47) e (48), calculou-se o intervalo de confiança para o MTTF. A Tabela 7 mostra os resultados dos intervalos de confiança para o λ_t e para o MTTF do componente:

Tabela 7 - Intervalo de Confiança para os Ejetores com a Análise no Tempo

Intervalo de Confiança		
	Limite Inferior	Limite Superior
λ_t	9,5E-06	2,6E-05
MTTF	38.497	105.809

Fonte: produção do próprio autor

Da mesma forma que anteriormente, utilizou-se as equações (28) e (29) para gerar os resultados do intervalo de confiança da taxa de falha para a distância percorrida do componente em análise, já para gerar o intervalo de confiança do MDTF utilizou-se a equação (31). A abordagem utilizada nas equações (47) e (48) foi a mesma utilizada nos cálculos que geraram o intervalo de confiança da taxa de falha para a distância percorrida, só que dessa vez foi usado o acumulado da distância percorrida pela frota inteira que foi de 4.814.546 km como base, calculado na Tabela 6. A Tabela 8 mostra esses resultados:

Tabela 8 - Intervalo de Confiança para os Ejetores com a Análise na Distância Percorrida

Intervalo de Confiança		
	Limite Inferior	Limite Superior
λ	5,1E-07	1,4E-06
MDTF	707.536	1.944.657

Fonte: produção do próprio autor

O nível de significância utilizado nas duas análises foi de $\alpha = 5\%$, ou seja, o nível de confiança para os intervalos das Tabelas 7 e 8 é de $(1 - \alpha) = 95\%$. Em Martins (2001) é apresentado que geralmente o nível de confiança utilizado é de 90%, 95%, 97,5% ou mais, escolheu-se um nível de confiança de 95% para as análises desenvolvidas porque um valor maior aumentaria muito a amplitude do intervalo, sendo que o valor de 95% já apresenta bons resultados.

Vale ressaltar que o intervalo de confiança considera o componente com uma distribuição exponencial de probabilidade de falha ao longo da distância percorrida, portanto, é considerado que o componente apresenta taxa de falha constante.

Levando em conta as considerações dos parágrafos anteriores e observando as Tabelas 7 e 8, chega-se à conclusão que os ejtores de água dos para-brisas apresentam uma taxa de falha λ_t entre $9,5 \cdot 10^{-6}$ e $2,6 \cdot 10^{-5}$ falhas/h e uma taxa de falha λ_d entre $5,1 \cdot 10^{-7}$ e $1,4 \cdot 10^{-6}$ falhas/km com 95% de confiança. Assim como, apresentam um MTTF entre 38.497 e 105.809 h e um MDTF entre 707.536 e 1.944.657 km com 95% de confiança.

Um exemplo de aplicação para esses resultados são as análises de segurança, no setor ferroviário a área de segurança operacional tem uma ligação muito forte com a confiabilidade. Muitos resultados gerados a partir de estudos da confiabilidade de componentes são utilizados nas análises de segurança desenvolvidas em projetos de novos trens, um parâmetro muito utilizado nesse campo é o λ_t . No exemplo em questão, para uma análise de segurança poderia

se utilizar o limite superior do λ_t estimado anteriormente, ou seja, $2,6 \cdot 10^{-5}$ falhas/h. Dessa forma estaria adotando-se uma posição conservadora, na qual considera o pior cenário para o λ_t do componente, uma posição imprescindível quando se trata de segurança, já que seria a maior taxa de falha esperada para o componente com 95% de confiança.

As análises apresentadas nesse capítulo podem ser utilizadas para outros componentes além dos que foram discutidos. Com as metodologias apresentadas é possível ter uma noção de quando a falha do componente pode ocorrer e se antecipar a ela, trocando-se o componente antes que ele venha a falhar, podendo-se analisar o comportamento das falhas do componente e determinar a melhor política de manutenção a ser adotada. A análise da confiabilidade dos componentes de um sistema pode ajudar a atacar os seus pontos mais fracos, em termos de confiabilidade, ajudando na melhora da disponibilidade do mesmo. Em termos de segurança, o uso de parâmetros mais confiáveis para a confiabilidade de componentes melhora a segurança do produto, já que deixa as análises mais próximas da realidade, de forma que se pode avaliar melhor as políticas de contenção de riscos do produto.

6 CONCLUSÃO

O trabalho apresentado nessa monografia mostrou os conceitos, metodologias e resultados obtidos para a confiabilidade de componentes ferroviários, a partir de uma ferramenta desenvolvida pelo autor, a Ferramenta de Análise da Confiabilidade de Componentes (FACC). Entretanto, os conceitos e metodologias apresentados não se restringem apenas ao mercado ferroviário, apesar da ferramenta desenvolvida ao longo do trabalho ter um foco em componentes de frotas de trens de passageiros.

Por meio das discussões e análises desenvolvidas na monografia pode-se concluir que quando se considera os componentes com uma distribuição exponencial para suas falhas acaba-se distanciando-se do que acontece na realidade e chegando a resultados não muito efetivos. A utilização da distribuição de Weibull para descrever o comportamento do tempo para falhar do componente tem uma abordagem melhor para a sua análise, graças a sua versatilidade e por conta de se aproximar mais da sua realidade.

Porém, nem sempre é possível analisar um componente por meio da distribuição de Weibull quando se utiliza dados de campo, uma vez que nem sempre os dados disponíveis são suficientes ou bons o bastante para se ter segurança na avaliação. Por esse motivo, discutiu-se também uma abordagem utilizando intervalo de confiança para se avaliar os parâmetros de confiabilidade do componente, como taxa de falha e MTTF, quando a avaliação utilizando a distribuição de Weibull não é possível. Essa abordagem apesar de não ser tão efetiva como a distribuição de Weibull, já que também considera o componente com uma distribuição exponencial para suas falhas, mostra-se conservadora para a avaliação do item, uma vez que se atribui intervalos para a análise do mesmo.

O foco da monografia foi a avaliação de itens não-reparáveis, sendo que para itens reparáveis foi feita uma breve discussão. Para estudos futuros pretende-se aprofundar no estudo da confiabilidade de itens reparáveis.

Por fim, conclui-se que o trabalho como um todo foi efetivo, em que foi desenvolvida uma ferramenta de fácil uso com base em metodologias internacionalmente reconhecidas para a avaliação da confiabilidade de componentes. Além disso, avaliou-se a confiabilidade de três componentes instalados em uma frota de trens do sistema metroviário da cidade de São Paulo - SP, com base em dados reais de campo e por meio da ferramenta desenvolvida.

REFERÊNCIAS

BOROSKI, C. **Perfil típico da missão**: documento técnico: linha 2: verde. São Paulo: Alstom, 2008. 9p.

CROW, L. H. **Reliability analysis for complex, repairable systems**. Alexandria: AMSAA, 1975. 39p. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/e176/06aeb2e7c003ad1b7610006bbb27ac622a10.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2017.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60300-3-5**: international standard: dependability management: part 3-5: application guide: reliability test conditions and statistical test principles. Geneva: IEC, 2001.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC-60605-4**: international standard: statistical procedures for exponential distribution: point estimates, confidence intervals, prediction intervals and tolerance intervals. Geneva: IEC, 2001.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC-61649**: international standard: weibull analysis. Geneva: IEC, 2008.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC-61710**: international standard: power law model: goodness-of-fit tests and estimation methods. Geneva: IEC, 2008.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001. 388p.

MARTINS, G. A. **Estatística geral e aplicada**. São Paulo: Atlas, 2001. 417p.

NATÁRIO, R. **Alta disponibilidade–medição (II)**: curva da banheira. Redes & Servidores. Disponível em: <<http://redes-e-servidores.blogspot.com.br/2011/02/alta-disponibilidademedicao-ii.html>>. Acesso em: 23 set. 2017.

O'CONNOR, P. D. T. II; KLEYNER, A. **Practical reliability engineering**. 5th ed. Chichester: Wiley, 2012. 512p.

PIAZZA, G. **Introdução à engenharia da confiabilidade**. Caxias do Sul: EDUCS, 2000. 128p.

PORTO MARAVILHA. **Concessionária do vlt carioca abre vagas para jovem aprendiz**. Disponível em: <<http://portomaravilha.com.br/noticiasdetalhe/4644>>. Acesso em: 23 set. 2017.

RAILWAY PRO. **Alstom booked EUR 1 billion of orders**. Disponível em: <<http://www.railwaypro.com/wp/alstom-booked-eur-1-billion-of-orders/>>. Acesso em: 23 set. 2017.

RMTS. **Por dentro do simulador da linha 4-amarela de metrô de São Paulo**. Disponível em: <<http://rmts.com.br/wp-01/por-dentro-do-simulador-da-linha-4-amarela-de-metro-de-sao-paulo/>>. Acesso em: 04 dez. 2017.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONTROLE DA QUALIDADE. **Engenharia da confiabilidade**: apostila do curso. São Paulo: ABCQ, 2003. 317 p.

ABERNATHY, R. B et al. **Weibull analysis handbook**. West Palm Beach: Pratt & Whitney, 1983. 228p.

SANTOS, A. F. **Gerenciamento da confiabilidade em projetos de material rodante ferroviário**. 2007. 259 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Engenharia de Projeto e Fabricação) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

APÊNDICE A - Distribuição Qui-Quadrado

Φ	$\chi^2_{0,005}$	$\chi^2_{0,01}$	$\chi^2_{0,025}$	$\chi^2_{0,05}$	$\chi^2_{0,1}$	$\chi^2_{0,25}$	$\chi^2_{0,75}$	$\chi^2_{0,90}$	$\chi^2_{0,95}$	$\chi^2_{0,975}$	$\chi^2_{0,99}$	$\chi^2_{0,995}$
1	0,000039	0,00016	0,001	0,004	0,016	0,102	1,323	2,706	3,841	5,024	6,635	7,879
2	0,010	0,020	0,051	0,103	0,211	0,575	2,773	4,605	5,991	7,378	9,210	10,597
3	0,072	0,115	0,216	0,352	0,584	1,213	4,108	6,251	7,815	9,348	11,345	12,838
4	0,207	0,297	0,484	0,711	1,064	1,923	5,385	7,779	9,488	11,143	13,277	14,860
5	0,412	0,554	0,831	1,145	1,610	2,675	6,626	9,236	11,070	12,833	15,086	16,750
6	0,676	0,872	1,237	1,635	2,204	3,455	7,841	10,645	12,592	14,449	16,812	18,548
7	0,989	1,239	1,690	2,167	2,833	4,255	9,037	12,017	14,067	16,013	18,475	20,278
8	1,344	1,646	2,180	2,733	3,490	5,071	10,219	13,362	15,507	17,535	20,090	21,955
9	1,735	2,088	2,700	3,325	4,168	5,899	11,389	14,684	16,919	19,023	21,666	23,589
10	2,156	2,558	3,247	3,940	4,865	6,737	12,549	15,987	18,307	20,483	23,209	25,188
11	2,603	3,053	3,816	4,575	5,578	7,584	13,701	17,275	19,675	21,920	24,725	26,757
12	3,074	3,571	4,404	5,226	6,304	8,438	14,845	18,549	21,026	23,337	26,217	28,300
13	3,565	4,107	5,009	5,892	7,042	9,299	15,984	19,812	22,362	24,736	27,688	29,819
14	4,075	4,660	5,629	6,571	7,790	10,165	17,117	21,064	23,685	26,119	29,141	31,319
15	4,601	5,229	6,262	7,261	8,547	11,037	18,245	22,307	24,996	27,488	30,578	32,801
16	5,142	5,812	6,908	7,962	9,312	11,912	19,369	23,542	26,296	28,845	32,000	34,267
17	5,697	6,408	7,564	8,672	10,085	12,792	20,489	24,769	27,587	30,191	33,409	35,718
18	6,265	7,015	8,231	9,390	10,865	13,675	21,605	25,989	28,869	31,526	34,805	37,156
19	6,844	7,633	8,907	10,117	11,651	14,562	22,718	27,204	30,144	32,852	36,191	38,582
20	7,434	8,260	9,591	10,851	12,443	15,452	23,828	28,412	31,410	34,170	37,566	39,997
21	8,034	8,897	10,283	11,591	13,240	16,344	24,935	29,615	32,671	35,479	38,932	41,401
22	8,643	9,542	10,982	12,338	14,041	17,240	26,039	30,813	33,924	36,781	40,289	42,796
23	9,260	10,196	11,689	13,091	14,848	18,137	27,141	32,007	35,172	38,076	41,638	44,181
24	9,886	10,856	12,401	13,848	15,659	19,037	28,241	33,196	36,415	39,364	42,980	45,559
25	10,520	11,524	13,120	14,611	16,473	19,939	29,339	34,382	37,652	40,646	44,314	46,928
26	11,160	12,198	13,844	15,379	17,292	20,843	30,435	35,563	38,885	41,923	45,642	48,290
27	11,808	12,879	14,573	16,151	18,114	21,749	31,528	36,741	40,113	43,195	46,963	49,645
28	12,461	13,565	15,308	16,928	18,939	22,657	32,620	37,916	41,337	44,461	48,278	50,993
29	13,121	14,256	16,047	17,708	19,768	23,567	33,711	39,087	42,557	45,722	49,588	52,336
30	13,787	14,953	16,791	18,493	20,599	24,478	34,800	40,256	43,773	46,979	50,892	53,672
31	14,458	15,655	17,539	19,281	21,434	25,390	35,887	41,422	44,985	48,232	52,191	55,003
32	15,134	16,362	18,291	20,072	22,271	26,304	36,973	42,585	46,194	49,480	53,486	56,328
33	15,815	17,074	19,047	20,867	23,110	27,219	38,058	43,745	47,400	50,725	54,776	57,648
34	16,501	17,789	19,806	21,664	23,952	28,136	39,141	44,903	48,602	51,966	56,061	58,964
35	17,192	18,509	20,569	22,465	24,797	29,054	40,223	46,059	49,802	53,203	57,342	60,275
36	17,887	19,233	21,336	23,269	25,643	29,973	41,304	47,212	50,998	54,437	58,619	61,581
37	18,586	19,960	22,106	24,075	26,492	30,893	42,383	48,363	52,192	55,668	59,893	62,883
38	19,289	20,691	22,878	24,884	27,343	31,815	43,462	49,513	53,384	56,896	61,162	64,181
39	19,996	21,426	23,654	25,695	28,196	32,737	44,539	50,660	54,572	58,120	62,428	65,476
40	20,707	22,164	24,433	26,509	29,051	33,660	45,616	51,805	55,758	59,342	63,691	66,766
41	21,421	22,906	25,215	27,326	29,907	34,585	46,692	52,949	56,942	60,561	64,950	68,053
42	22,138	23,650	25,999	28,144	30,765	35,510	47,766	54,090	58,124	61,777	66,206	69,336
43	22,859	24,398	26,785	28,965	31,625	36,436	48,840	55,230	59,304	62,990	67,459	70,616
44	23,584	25,148	27,575	29,787	32,487	37,363	49,913	56,369	60,481	64,201	68,710	71,893
45	24,311	25,901	28,366	30,612	33,350	38,291	50,985	57,505	61,656	65,410	69,957	73,166
46	25,041	26,657	29,160	31,439	34,215	39,220	52,056	58,641	62,830	66,617	71,201	74,437
47	25,775	27,416	29,956	32,268	35,081	40,149	53,127	59,774	64,001	67,821	72,443	75,704
48	26,511	28,177	30,755	33,098	35,949	41,079	54,196	60,907	65,171	69,023	73,683	76,969
49	27,249	28,941	31,555	33,930	36,818	42,010	55,265	62,038	66,339	70,222	74,919	78,231
50	27,991	29,707	32,357	34,764	37,689	42,942	56,334	63,167	67,505	71,420	76,154	79,490

Φ	$\chi^2_{0,005}$	$\chi^2_{0,01}$	$\chi^2_{0,025}$	$\chi^2_{0,05}$	$\chi^2_{0,1}$	$\chi^2_{0,25}$	$\chi^2_{0,75}$	$\chi^2_{0,90}$	$\chi^2_{0,95}$	$\chi^2_{0,975}$	$\chi^2_{0,99}$	$\chi^2_{0,995}$
51	28,735	30,475	33,162	35,600	38,560	43,874	57,401	64,295	68,669	72,616	77,386	80,747
52	29,481	31,246	33,968	36,437	39,433	44,808	58,468	65,422	69,832	73,810	78,616	82,001
53	30,230	32,018	34,776	37,276	40,308	45,741	59,534	66,548	70,993	75,002	79,843	83,253
54	30,981	32,793	35,586	38,116	41,183	46,676	60,600	67,673	72,153	76,192	81,069	84,502
55	31,735	33,570	36,398	38,958	42,060	47,610	61,665	68,796	73,311	77,380	82,292	85,749
56	32,490	34,350	37,212	39,801	42,937	48,546	62,729	69,919	74,468	78,567	83,513	86,994
57	33,248	35,131	38,027	40,646	43,816	49,482	63,793	71,040	75,624	79,752	84,733	88,236
58	34,008	35,913	38,844	41,492	44,696	50,419	64,857	72,160	76,778	80,936	85,950	89,477
59	34,770	36,698	39,662	42,339	45,577	51,356	65,919	73,279	77,931	82,117	87,166	90,715
60	35,534	37,485	40,482	43,188	46,459	52,294	66,981	74,397	79,082	83,298	88,379	91,952
61	36,301	38,273	41,303	44,038	47,342	53,232	68,043	75,514	80,232	84,476	89,591	93,186
62	37,068	39,063	42,126	44,889	48,226	54,171	69,104	76,630	81,381	85,654	90,802	94,419
63	37,838	39,855	42,950	45,741	49,111	55,110	70,165	77,745	82,529	86,830	92,010	95,649
64	38,610	40,649	43,776	46,595	49,996	56,050	71,225	78,860	83,675	88,004	93,217	96,878
65	39,383	41,444	44,603	47,450	50,883	56,990	72,285	79,973	84,821	89,177	94,422	98,105
66	40,158	42,240	45,431	48,305	51,770	57,931	73,344	81,085	85,965	90,349	95,626	99,330
67	40,935	43,038	46,261	49,162	52,659	58,872	74,403	82,197	87,108	91,519	96,828	100,554
68	41,713	43,838	47,092	50,020	53,548	59,814	75,461	83,308	88,250	92,689	98,028	101,776
69	42,494	44,639	47,924	50,879	54,438	60,756	76,519	84,418	89,391	93,856	99,228	102,996
70	43,275	45,442	48,758	51,739	55,329	61,698	77,577	85,527	90,531	95,023	100,425	104,215
71	44,058	46,246	49,592	52,600	56,221	62,641	78,634	86,635	91,670	96,189	101,621	105,432
72	44,843	47,051	50,428	53,462	57,113	63,585	79,690	87,743	92,808	97,353	102,816	106,648
73	45,629	47,858	51,265	54,325	58,006	64,528	80,747	88,850	93,945	98,516	104,010	107,862
74	46,417	48,666	52,103	55,189	58,900	65,472	81,803	89,956	95,081	99,678	105,202	109,074
75	47,206	49,475	52,942	56,054	59,795	66,417	82,858	91,061	96,217	100,839	106,393	110,286
76	47,997	50,286	53,782	56,920	60,690	67,362	83,913	92,166	97,351	101,999	107,583	111,495
77	48,788	51,097	54,623	57,786	61,586	68,307	84,968	93,270	98,484	103,158	108,771	112,704
78	49,582	51,910	55,466	58,654	62,483	69,252	86,022	94,374	99,617	104,316	109,958	113,911
79	50,376	52,725	56,309	59,522	63,380	70,198	87,077	95,476	100,749	105,473	111,144	115,117
80	51,172	53,540	57,153	60,391	64,278	71,145	88,130	96,578	101,879	106,629	112,329	116,321
81	51,969	54,357	57,998	61,261	65,176	72,091	89,184	97,680	103,010	107,783	113,512	117,524
82	52,767	55,174	58,845	62,132	66,076	73,038	90,237	98,780	104,139	108,937	114,695	118,726
83	53,567	55,993	59,692	63,004	66,976	73,985	91,289	99,880	105,267	110,090	115,876	119,927
84	54,368	56,813	60,540	63,876	67,876	74,933	92,342	100,980	106,395	111,242	117,057	121,126
85	55,170	57,634	61,389	64,749	68,777	75,881	93,394	102,079	107,522	112,393	118,236	122,325
86	55,973	58,456	62,239	65,623	69,679	76,829	94,446	103,177	108,648	113,544	119,414	123,522
87	56,777	59,279	63,089	66,498	70,581	77,777	95,497	104,275	109,773	114,693	120,591	124,718
88	57,582	60,103	63,941	67,373	71,484	78,726	96,548	105,372	110,898	115,841	121,767	125,913
89	58,389	60,928	64,793	68,249	72,387	79,675	97,599	106,469	112,022	116,989	122,942	127,106
90	59,196	61,754	65,647	69,126	73,291	80,625	98,650	107,565	113,145	118,136	124,116	128,299
91	60,005	62,581	66,501	70,003	74,196	81,574	99,700	108,661	114,268	119,282	125,289	129,491
92	60,815	63,409	67,356	70,882	75,100	82,524	100,750	109,756	115,390	120,427	126,462	130,681
93	61,625	64,238	68,211	71,760	76,006	83,474	101,800	110,850	116,511	121,571	127,633	131,871
94	62,437	65,068	69,068	72,640	76,912	84,425	102,850	111,944	117,632	122,715	128,803	133,059
95	63,250	65,898	69,925	73,520	77,818	85,376	103,899	113,038	118,752	123,858	129,973	134,247
96	64,063	66,730	70,783	74,401	78,725	86,327	104,948	114,131	119,871	125,000	131,141	135,433
97	64,878	67,562	71,642	75,282	79,633	87,278	105,997	115,223	120,990	126,141	132,309	136,619
98	65,694	68,396	72,501	76,164	80,541	88,229	107,045	116,315	122,108	127,282	133,476	137,803
99	66,510	69,230	73,361	77,046	81,449	89,181	108,093	117,407	123,225	128,422	134,642	138,987
100	67,328	70,065	74,222	77,929	82,358	90,133	109,141	118,498	124,342	129,561	135,807	140,169

ANEXO A - Lista de Falhas dos Faróis Frontais dos Carros-Cabine

Description FWS	Trainset Id	Vehicle	Report Date	Event Date	Detail (event)	Detail Assessment	Detail Interventi	Out service date	In service date
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE222	1356	terça-feira, 20 de julho de 2010	terça-feira, 20 de julho de 2010	FAROL BAIXO LADO ESQUERDO NÃO ACENDE	QUEIMADO	SUBSTITUÍDA LÂMPADA FAROL TESTADO OK	7/20/2010	7/20/2010
03.03.02.- Farol Direito	TUE220	1349	segunda-feira, 9 de agosto de 2010	sábado, 7 de agosto de 2010	FAROL LADO DIREITO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	8/9/2010	8/9/2010
03.03.02.- Farol Direito	TUE220	1344	sexta-feira, 20 de agosto de 2010	sexta-feira, 20 de agosto de 2010	CARRO 1 FAROL DIREITO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	8/20/2010	8/20/2010
03.03.02.- Farol Direito	TUE227	1386	quinta-feira, 24 de fevereiro de 2011	quarta-feira, 23 de fevereiro de 2011	COMANDO NORTE 2 FARÓIS APAGADOS	FAROL NÃO ACENDE	SUBSTITUÍDA AS LÂMPADAS	2/23/2011	2/23/2011
03.03.02.- Farol Direito	TUE227	1386	quinta-feira, 24 de fevereiro de 2011	quinta-feira, 24 de fevereiro de 2011	FAROL FRACO NOS 2 LADOS APAGADOS	FAROL NÃO ACENDE	SUBSTITUÍDA AS LÂMPADAS	2/24/2011	2/24/2011
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE223	1362	quarta-feira, 15 de dezembro de 2010	terça-feira, 30 de novembro de 2010	FAROL BAIXO INOPERANTE	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	12/15/2010	12/15/2010
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE223	1367	quinta-feira, 23 de dezembro de 2010	terça-feira, 21 de dezembro de 2010	COMANDO SUL FAROL BAIXO APAGADO.	LÂMPADA DEFEITUOSA	SUBSTITUÍDO	12/23/2010	12/23/2010
03.03.02.- Farol Direito	TUE222	1361	sexta-feira, 10 de dezembro de 2010	sábado, 27 de novembro de 2010	COMANDO SUL FAROL LADO DIREITO APAGADO	LÂMPADA QUEIMADA	SUBSTITUÍDO	12/10/2010	12/10/2010
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE225	1374	quinta-feira, 27 de janeiro de 2011	quinta-feira, 27 de janeiro de 2011	COMANDO NORTE FAROL APAGADO.	FAROL NÃO ACENDE	SUBSTITUÍDO	1/27/2011	1/27/2011
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE220	1344	sábado, 9 de outubro de 2010	segunda-feira, 4 de outubro de 2010	FAROL BAIXO INOPERANTE	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	10/9/2010	10/9/2010
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE220	1344	sábado, 9 de outubro de 2010	sábado, 9 de outubro de 2010	COMANDO NORTE FAROL LADO ESQUERDO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	10/9/2010	10/9/2010
03.03.02.- Farol Direito	TUE224	1373	terça-feira, 22 de fevereiro de 2011	terça-feira, 22 de fevereiro de 2011	FAROL LADO DIREITO APAGADO	FAROL NÃO ACENDE	SUBSTITUÍDA A LÂMPADA	2/22/2011	2/22/2011
03.03.02.- Farol Direito	TUE221	1355	sexta-feira, 10 de dezembro de 2010	sábado, 27 de novembro de 2010	COMANDO SUL FAROL LADO DIREITO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	12/10/2010	12/10/2010
03.03.02.- Farol Direito	TUE224	1368	quinta-feira, 24 de março de 2011	quinta-feira, 24 de março de 2011	COMANDO NORTE FAROL DIREITO APAGADO	LÂMPADA DEFEITUOSA	SUBSTITUÍDO	3/24/2011	3/24/2011

Description FWS	Trainset Id	Vehicle	Report Date	Event Date	Detail (event)	Detail Assessment	Detail Intervent	Out service date	In service date
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE 222	1361	quarta-feira, 9 de fevereiro de 2011	terça-feira, 8 de fevereiro de 2011	COMANDO SUL FAROL BAIXO LADO ESQUERDO APAGADO	FAROL NÃO ACENDE	SUBSTITUÍDA A LÂMPADA DO FAROL	2/8/2011	2/8/2011
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE 221	1350	quarta-feira, 19 de janeiro de 2011	domingo, 16 de janeiro de 2011	FAROL FRACO LADO ESQUERDO NÃO ACENDE	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	1/19/2011	1/19/2011
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE 225	1379	sexta-feira, 22 de abril de 2011	sexta-feira, 22 de abril de 2011	FAROL LADO ESQUERDO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	4/22/2011	4/22/2011
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE 221	1355	sábado, 19 de fevereiro de 2011	sábado, 19 de fevereiro de 2011	FAROL APAGADO LADO ESQUERDO	FAROL NÃO ACENDE	SUBSTITUÍDA A LÂMPADA	2/19/2011	2/19/2011
03.03.02 - Farol Direito	TUE 221	1350	quarta-feira, 23 de fevereiro de 2011	quarta-feira, 23 de fevereiro de 2011	COMANDO NORTE FAROL DIREITO ALTO/BAIXO APAGADO	FAROL NÃO ACENDE	SUBSTITUÍDA A LÂMPADA	2/23/2011	2/23/2011
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE 223	1367	segunda-feira, 23 de maio de 2011	sexta-feira, 20 de maio de 2011	FAROL BAIXO LADO ESQUERDO NÃO ACENDE	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	5/22/2011	5/22/2011
03.03.02 - Farol Direito	TUE 215	1314	sábado, 21 de agosto de 2010	sábado, 21 de agosto de 2010	FAROL FRACO LADO DIREITO NÃO ACENDE	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	8/21/2010	8/21/2010
03.03.02 - Farol Direito	TUE 225	1379	quarta-feira, 29 de junho de 2011	quarta-feira, 29 de junho de 2011	FAROL LADO DIREITO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	6/29/2011	6/29/2011
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE 226	1380	sexta-feira, 12 de agosto de 2011	sexta-feira, 12 de agosto de 2011	COMANDO NORTE FAROL BAIXO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	8/12/2011	8/12/2011
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE 220	1349	quarta-feira, 20 de abril de 2011	terça-feira, 19 de abril de 2011	CARRO-6 LÂMPADA DO FAROL LADO ESQUERDO APAGADA	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	4/20/2011	4/20/2011
03.03.02 - Farol Direito	TUE 222	1356	quarta-feira, 13 de julho de 2011	terça-feira, 12 de julho de 2011	CARRO 1 FAROL BAIXO LADO C NÃO ACENDE	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	7/12/2011	7/12/2011
03.03.02 - Farol Direito	TUE 227	1386	sexta-feira, 11 de novembro de 2011	quarta-feira, 9 de novembro de 2011	COMANDO NORTE FAROL BAIXO LADO DIREITO NÃO ACENDE	QUEIMADO	FAROL BAIXO INOPERANTE, FOI SUBSTITUÍDO	11/11/2011	11/11/2011
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE 215	1319	sábado, 20 de novembro de 2010	quinta-feira, 18 de novembro de 2010	COMANDO SUL FAROL BAIXO LADO ESQUERDO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	11/20/2010	11/20/2010
03.03.02 - Farol Direito	TUE 224	1373	terça-feira, 27 de setembro de 2011	domingo, 25 de setembro de 2011	FAROL DIREITO BAIXO NÃO ACENDE	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	9/27/2011	9/27/2011

Description FWS	Trainset Id	Vehicle	Report Date	Event Date	Detail (event)	Detail Assessment	Detail Intervent	Out service date	In service date
03.03.01- Farol Esquerdo	TUE 223	1362	terça-feira, 13 de setembro de 2011	sábado, 10 de setembro de 2011	FAROL FORTE E FRACO LADO ESQUERDO NÃO ACENDE	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	9/13/2011	9/13/2011
03.03.02 - Farol Direito	TUE 225	1374	quarta-feira, 19 de outubro de 2011	terça-feira, 18 de outubro de 2011	FAROL BAIXO LADO DIREITO NÃO ACENDE	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	10/19/2011	10/19/2011
03.03.02 - Farol Direito	TUE 215	1319	quarta-feira, 29 de dezembro de 2010	terça-feira, 28 de dezembro de 2010	FAROL FRACO/FORTE LADO DIREITO APAGADO	FAROL NÃO ACENDE	SUBSTITUÍDO	12/29/2010	12/29/2010
03.03.02 - Farol Direito	TUE 216	1320	terça-feira, 8 de fevereiro de 2011	sábado, 5 de fevereiro de 2011	FAROL FRACO LADO DIREITO NÃO ACENDE	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	2/7/2011	2/7/2011
03.03.01- Farol Esquerdo	TUE 220	1349	sexta-feira, 22 de julho de 2011	quinta-feira, 14 de julho de 2011	01.FAROL APAGADO	CABO DEFEITUOSO	FAROL BAIXO QUEIMADO, SUBSTITUÍDO LÂMPADA DO FAROL	7/21/2011	7/21/2011
03.03.02 - Farol Direito	TUE 222	1361	sábado, 8 de outubro de 2011	quinta-feira, 6 de outubro de 2011	COMANDO SUL FAROL BAIXO LADO DIREITO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	10/8/2011	10/8/2011
03.03.02 - Farol Direito	TUE 219	1343	sexta-feira, 29 de julho de 2011	quarta-feira, 27 de julho de 2011	FAROL FRACO LADO DIREITO NÃO ACENDE	LÂMPADA DEFEITUOSA	SUBSTITUÍDO	7/28/2011	7/28/2011
03.03.01- Farol Esquerdo	TUE 224	1373	quinta-feira, 5 de janeiro de 2012	terça-feira, 3 de janeiro de 2012	COMANDO SUL FAROL BAIXO LADO ESQUERDO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDA LÂMPADA	1/5/2012	1/5/2012
03.03.01- Farol Esquerdo	TUE 222	1356	sábado, 12 de novembro de 2011	quinta-feira, 10 de novembro de 2011	COMANDO NORTE FAROL BAIXO LADO ESQUERDO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	11/12/2011	11/12/2011
03.03.01- Farol Esquerdo	TUE 213	1302	sexta-feira, 4 de fevereiro de 2011	quinta-feira, 3 de fevereiro de 2011	COMANDO NORTE FAROL FRACO LADO ESQUERDO APAGADO	FAROL NÃO ACENDE	SUBSTITUÍDO LÂMPADA	2/3/2011	2/3/2011
03.03.02 - Farol Direito	TUE 217	1326	segunda-feira, 16 de maio de 2011	sábado, 14 de maio de 2011	COMANDO NORTE FAROL FRACO E FORTE NO LADO DIREITO NÃO ACENDE	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	5/16/2011	5/16/2011
03.03.02 - Farol Direito	TUE 220	1344	quinta-feira, 29 de setembro de 2011	segunda-feira, 26 de setembro de 2011	COMANDO NORTE FAROL BAIXO LADO DIREITO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	9/29/2011	9/29/2011
03.03.02 - Farol Direito	TUE 221	1350	quarta-feira, 30 de novembro de 2011	terça-feira, 29 de novembro de 2011	COMANDO OESTE FAROL LADO DIREITO NÃO ACENDE, FRACO E FORTE	QUEIMADO, LADO DIREITO	SUBSTITUÍDO	11/30/2011	11/30/2011
03.03.01- Farol Esquerdo	TUE 218	1332	sexta-feira, 16 de setembro de 2011	quinta-feira, 15 de setembro de 2011	FAROL BAIXO LADO ESQUERDO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	9/16/2011	9/16/2011

Description FWS	Trainset Id	Vehicle	Report Date	Event Date	Detail (event)	Detail Assessment	Detail Interventi	Out service date	In service date
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE 221	1350	quarta-feira, 28 de dezembro de 2011	quarta-feira, 28 de dezembro de 2011	COMANDO OESTE FAROL BAIXO LADO ESQUERDO NÃO ACENDE	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	12/28/2011	12/28/2011
03.03.02.- Farol Direito	TUE 220	1344	terça-feira, 24 de janeiro de 2012	sexta-feira, 20 de janeiro de 2012	FAROL LADO DIREITO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	1/24/2012	1/24/2012
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE 214	1308	segunda-feira, 22 de agosto de 2011	sábado, 20 de agosto de 2011	COMANDO NORTE FAROL LADO ESQUERDO ALTO/BAIXO INOPERANTE	LAMPADA DEFEITUOSA	SUBSTITUÍDO	8/22/2011	8/22/2011
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE 217	1326	segunda-feira, 31 de outubro de 2011	segunda-feira, 31 de outubro de 2011	FAROL BAIXO LADO ESQUERDO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	10/31/2011	10/31/2011
03.03.01.- Farol Esquerdo	TUE 217	1331	quarta-feira, 21 de dezembro de 2011	terça-feira, 20 de dezembro de 2011	CARRO-6 FAROL LADO ESQUERDO APAGADO	QUEIMADO	SUBSTITUÍDO	12/21/2011	12/21/2011

ANEXO B - Lista de Falhas das Palhetas dos Para-Brisas

Description FWS	Trainset Id	Vehicle	Report Date	Event Date	Detail (event)	Detail Assessment	Detail Interventi	Out service date	In service date
0103.0105 - Palhetado Limpador de Para-brisa	TUE 212	1301	segunda-feira, 26 de outubro de 2009	segunda-feira, 26 de outubro de 2009	LIMPADOR DE PARA-BRISA INOP.	DANIFICADO	SUBSTITUÍDO	10/26/2009	10/26/2009
0103.0105 - Palhetado Limpador de Para-brisa	TUE 225	1374	segunda-feira, 7 de fevereiro de 2011	sexta-feira, 4 de fevereiro de 2011	HASTE LIMPADOR PARABRISA TORTA	LIMPADOR DE PARA-BRISA INOPERANTE/DANIFICADO	SUBSTITUÍDO PALHETA DO LIMPADOR	2/5/2011	2/5/2011
0103.0105 - Palhetado Limpador de Para-brisa	TUE 227	1391	quinta-feira, 7 de abril de 2011	quinta-feira, 7 de abril de 2011	LIMPADOR DE PARA-BRISA QUEBRADO	QUEBRADO	SUBSTITUÍDO PALHETA DO LIMPADOR	4/7/2011	4/7/2011
0103.0105 - Palhetado Limpador de Para-brisa	TUE 222	1356	segunda-feira, 7 de fevereiro de 2011	sábado, 5 de fevereiro de 2011	HASTE DO PARABRISA TORTA	GASTO	SUBSTITUÍDO	2/7/2011	2/7/2011
0103.0105 - Palhetado Limpador de Para-brisa	TUE 223	1367	segunda-feira, 14 de março de 2011	domingo, 13 de março de 2011	BORRACHA DO LIMPADOR DO PARABRISA SOLTA	BORRACHA COM FADIGA	SUBSTITUÍDO PALHETA	3/13/2011	3/13/2011
0103.0105 - Palhetado Limpador de Para-brisa	TUE 221	1355	segunda-feira, 7 de fevereiro de 2011	sábado, 5 de fevereiro de 2011	HASTE DO PARABRISA TORTA	GASTO	SUBSTITUÍDO PALHETA DO LIMPADOR	2/7/2011	2/7/2011
0103.0105 - Palhetado Limpador de Para-brisa	TUE 218	1332	sábado, 5 de fevereiro de 2011	sexta-feira, 4 de fevereiro de 2011	HASTE LIMPADOR PARABRISA TORTA	LIMPADOR DE PARA-BRISA INOPERANTE/DANIFICADO	SUBSTITUÍDO PALHETA DO LIMPADOR	2/4/2011	2/4/2011
0103.0105 - Palhetado Limpador de Para-brisa	TUE 222	1356	sexta-feira, 10 de junho de 2011	quarta-feira, 8 de junho de 2011	LIMPADOR PARABRISA LAMINA BORRACHA RASGADA	CISALHADO	SUBSTITUÍDO	6/10/2011	6/10/2011
0103.0105 - Palhetado Limpador de Para-brisa	TUE 216	1325	quarta-feira, 16 de março de 2011	quarta-feira, 16 de março de 2011	PALHETA DO LIMPADOR PARABRISA SOLTA	DEFEITUOSA	SUBSTITUÍDO	3/16/2011	3/16/2011

ANEXO C - Lista de Falhas dos Ejetores de Água dos Para-Brisas

Description FWS	Transmissão	Vehicle Id	Report Date	Event Date	Início de operação do TUE	Detail (event)	Detail Assessment	Detail Intervention	Out service	In service
0103.0103 - Esguichador (Ejetor)	TUE 213	1307	sexta-feira, 12 de março de 2010	quarta-feira, 15 de abril de 2009	domingo, 1 de março de 2009	FALTANDO 1 ESGUICHADOR NO PARABRISA	PRETENDO NA GUIA	SUBSTITUÍDO	14/2010	3/12/2010
0103.0103 - Esguichador (Ejetor)	TUE 224	1368	terça-feira, 18 de maio de 2010	quarta-feira, 5 de maio de 2010	segunda-feira, 1 de março de 2010	FALTA UM EJETOR DO LIMPADOR DE PARABRISA	FALTANDO	SUBSTITUÍDO	5/19/2010	5/18/2010
0103.0103 - Esguichador (Ejetor)	TUE 221	1350	terça-feira, 20 de abril de 2010	sexta-feira, 12 de março de 2010	terça-feira, 1 de dezembro de 2009	2 CM DOS FALTA UM ESGUICHADOR DE AGUA	DEFETUOSA	SUBSTITUÍDO	4/20/2010	4/20/2010
0103.0103 - Esguichador (Ejetor)	TUE 222	1356	quarta-feira, 5 de maio de 2010	quarta-feira, 5 de maio de 2010	segunda-feira, 1 de fevereiro de 2010	FALTA UM EJETOR DO LIMPADOR DE PARABRISA	QUEBRADO	SUBSTITUÍDO	5/5/2010	5/5/2010
0103.0103 - Esguichador (Ejetor)	TUE 222	1361	quarta-feira, 5 de maio de 2010	quarta-feira, 5 de maio de 2010	segunda-feira, 1 de fevereiro de 2010	FALTA UM EJETOR DO LIMPADOR DE PARABRISA	QUEBRADO	SUBSTITUÍDO	5/5/2010	5/5/2010
0103.0103 - Esguichador (Ejetor)	TUE 220	1349	terça-feira, 29 de junho de 2010	quarta-feira, 5 de maio de 2010	terça-feira, 1 de dezembro de 2009	FALTA UM EJETOR DO LIMPADOR DE PARABRISA	QUEBRADO	SUBSTITUÍDO	6/29/2010	6/29/2010
0103.0103 - Esguichador (Ejetor)	TUE 219	1343	quinta-feira, 6 de maio de 2010	quarta-feira, 5 de maio de 2010	domingo, 1 de novembro de 2009	FALTAM DOIS EJETORES DO LIMPADOR DE PARABRISA	QUEBRADO	SUBSTITUÍDO	5/6/2010	5/6/2010
0103.0103 - Esguichador (Ejetor)	TUE 218	1332	sexta-feira, 18 de junho de 2010	quarta-feira, 5 de maio de 2010	domingo, 1 de novembro de 2009	FALTA UM EJETOR DO LIMPADOR DE PARABRISA	QUEBRADO	SUBSTITUÍDO	6/18/2010	6/18/2010
0103.0103 - Esguichador (Ejetor)	TUE 218	1337	sexta-feira, 18 de junho de 2010	quarta-feira, 5 de maio de 2010	domingo, 1 de novembro de 2009	FALTA UM EJETOR DO LIMPADOR DE PARABRISA	QUEBRADO	SUBSTITUÍDO	6/18/2010	6/18/2010
0103.0103 - Esguichador (Ejetor)	TUE 217	1326	sexta-feira, 18 de junho de 2010	quarta-feira, 5 de maio de 2010	quarta-feira, 1 de julho de 2009	FALTA UM EJETOR DO LIMPADOR DE PARABRISA	QUEBRADO	SUBSTITUÍDO	6/18/2010	6/18/2010
0103.0103 - Esguichador (Ejetor)	TUE 217	1331	sexta-feira, 18 de junho de 2010	quarta-feira, 5 de maio de 2010	quarta-feira, 1 de julho de 2009	FALTAM DOIS EJETORES DO LIMPADOR DE PARABRISA	QUEBRADO	SUBSTITUÍDO	6/18/2010	6/18/2010
0103.0103 - Esguichador (Ejetor)	TUE 212	1301	quarta-feira, 5 de maio de 2010	domingo, 2 de maio de 2010	sexta-feira, 1 de maio de 2009	FALTAM DOIS EJETORES DO LIMPADOR DE PARABRISA	SOLTO	SUBSTITUÍDO	5/5/2010	5/13/2010
0103.0103 - Esguichador (Ejetor)	TUE 216	1320	terça-feira, 8 de fevereiro de 2011	sexta-feira, 4 de fevereiro de 2011	segunda-feira, 1 de junho de 2009	ESGUICHADOR SEM ÁGUA	QUEBRADO	SUBSTITUÍDO	2/7/2011	2/7/2011
0103.0103 - Esguichador (Ejetor)	TUE 214	1308	sexta-feira, 11 de fevereiro de 2011	sexta-feira, 4 de fevereiro de 2011	sexta-feira, 1 de maio de 2009	ESGUICHADOR INOPERANTE	QUEBRADO	SUBSTITUÍDO	2/10/2011	2/10/2011