

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO DE ELETROTÉCNICA  
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

**DANILO BRINATI VIEIRA**

**ANÁLISE DE DADOS DE VIDA APLICADA À MANUTENÇÃO DE  
TURBO ALIMENTADORES DE LOCOMOTIVAS**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2016**

**DANILO BRINATI VIEIRA**

**ANÁLISE DE DADOS DE VIDA APLICADA À MANUTENÇÃO DE  
TURBO ALIMENTADORES DE LOCOMOTIVAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade, do Departamento de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues

**CURITIBA**

**2016**

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS CURITIBA  
DEPARTAMENTO DE ELETROTÉCNICA  
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

**TERMO DE APROVAÇÃO**

**ANÁLISE DE DADOS DE VIDA APLICADA À MANUTENÇÃO DE TURBO  
ALIMENTADORES DE LOCOMOTIVAS**

por

**DANILO BRINATI VIEIRA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 15 de dezembro de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Marcelo Rodrigues  
Prof. Orientador

---

Prof. Dr. Emerson Rigoni

---

Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

## RESUMO

VIEIRA, Danilo B. **ANÁLISE DE DADOS DE VIDA APLICADA À MANUTENÇÃO DE TURBO ALIMENTADORES DE LOCOMOTIVAS**. 2016. 53 f. Monografia do Curso de Especialização em Engenharia de Confiabilidade - Departamento de Eletrotécnica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho demonstra o uso de ferramentas de Engenharia da Confiabilidade, principalmente a análise de dados de vida, para a definição de estratégias de manutenção de turbo alimentadores de locomotivas, com o objetivo de otimizar o custo total de manutenção e aumentar a confiabilidade do sistema, reduzindo falhas catastróficas que geram grandes impactos na circulação de trens. A pesquisa é aplicada e pode ser definida como bibliográfica e documental, utilizando documentos e procedimentos de manutenção referentes ao ativo em estudo. Em relação aos resultados, buscou-se identificar oportunidades de revisão dos intervalos de manutenção baseadas no comportamento de falhas do componente, mantendo o alinhamento com o planejamento estratégico da empresa. Foram definidas através deste trabalho as estratégias que bloqueiam cada modo de falha, além do intervalo de substituição preventiva que minimiza o custo de manutenção do componente, reduzindo o custo de manutenção da empresa.

**Palavras-chave:** Confiabilidade. Turbo Alimentador. Análise de Dados de Vida. Tempo Ótimo de Substituição Preventiva.

## ABSTRACT

VIEIRA, Danilo B. **LIFE DATA ANALYSIS APLIED TO LOCOMOTIVES TURBOCHARGERS MAINTENANCE**. 2016. 53 f. Monografia do Curso de Especialização em Engenharia de Confiabilidade - Departamento de Eletrotécnica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This study demonstrate the use of Reliability Engineering tools, principally the life data analysis, in the definition of locomotive turbocharger maintenance strategies, in order to optimize the total cost of maintenance and increase the system reliability, reducing the risk of catastrophic failures that can produce large impacts on trains operations. This is an applied research and can be defined as bibliographic and documentary, using maintenance records and procedures about the component (turbocharger). On the results, the study identified opportunities to review the maintenance intervals based on component failure behavior, aligned to the company's strategic planning. Through this work were defined strategies that reduce the incidence of each failure mode, as well the preventive replacement interval that minimizes the maintenance cost of the component, reducing the maintenance cost of the company.

**Keywords:** Reliability. Turbocharger. Life Data Analysis. Optimum Preventive Maintenance Replacement Time.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Locomotiva Diesel Elétrica .....	15
Figura 2 – Diagrama funcional da transmissão de energia em uma locomotiva Diesel Elétrica.....	16
Figura 3 – Motor Diesel.....	17
Figura 4 – Motor Diesel em corte .....	17
Figura 5 – Conjunto de força.....	18
Figura 6 – Pistão .....	19
Figura 7 – Bielas .....	19
Figura 8 – Eixo Virabrequim.....	20
Figura 9 – Turbo Alimentador.....	21
Figura 10 – Conjunto do Rotor .....	22
Figura 11 – Interface do turbo com os sistemas de ar e gases de escape do motor	24
Figura 12 – Efeito da variação do parâmetro $\beta$ na distribuição Weibull .....	30
Figura 13 – Efeito da variação do parâmetro $\eta$ na distribuição Weibull .....	30
Figura 14 – Efeito da variação do parâmetro $\gamma$ na distribuição Weibull .....	31
Figura 15 – Tempo ótimo de substituição preventiva .....	33

## LISTA DE TABELAS

Quadro 1 – Relatório de origem dos dados de vida .....	36
Quadro 2 – Distribuições de vida para os modos de falha estudados .....	45
Quadro 3 – Parâmetros da distribuição de vida do grupo “demais modos de falha” .	47

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Confiabilidade x Tempo – Modo de Falha “Fratura da roda quente” .....	37
Gráfico 2 – Gráfico de contorno comparando populações – Modo de Falha “Fratura da roda quente” .....	38
Gráfico 3 – Confiabilidade x Tempo – Modo de Falha “Passagem de óleo” .....	40
Gráfico 4 – Função Densidade de Probabilidade – Modo de Falha “Passagem de óleo” .....	40
Gráfico 5 – Taxa de Falha x Tempo – Modo de Falha “Passagem de óleo” .....	41
Gráfico 6 – Custo de manutenção x Tempo – Modo de Falha “Passagem de óleo” .....	42
Gráfico 7 – Confiabilidade x Tempo – Demais modos de falha .....	43
Gráfico 8 – Função Densidade de Probabilidade – Demais modos de falha .....	44
Gráfico 9 – Taxa de Falha x Tempo – Demais modos de falha .....	45
Gráfico 10 – Tempo ótimo de preventiva – Demais modos de falha.....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS

MWh Megawatt-hora

Hh Homem-hora

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1. TEMA .....	10
1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	11
1.3. JUSTIFICATIVA.....	11
1.4. OBJETIVOS .....	12
1.4.1. OBJETIVO GERAL.....	12
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
1.5. METODOLOGIA.....	13
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	14
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
2.1. A LOCOMOTIVA .....	15
2.1.1. MOTOR DIESEL .....	16
2.1.2. CONJUNTO DE FORÇA .....	18
2.1.3. VIRABREQUIM .....	20
2.2. TURBO ALIMENTADOR .....	20
2.2.1. CONJUNTO DO ALOJAMENTO DA TURBINA .....	21
2.2.2. CONJUNTO DO ROTOR.....	21
2.2.3. CONJUNTO DE ENTRADA DA TURBINA .....	22
2.2.4. CONJUNTO DO ALOJAMENTO DO COMPRESSOR.....	22
2.2.5. INTERFACE COM OS SISTEMAS DA LOCOMOTIVA.....	22
2.2.5.1. ÓLEO LUBRIFICANTE.....	23
2.2.5.2. GASES DE ESCAPE.....	23
2.2.5.3. AR DO MOTOR.....	23
2.2.5.4. ÁGUA DE ARREFECIMENTO.....	23
2.2.5.5. AR DE VEDAÇÃO .....	24
2.3. INTRODUÇÃO A ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE.....	24
2.4. TIPOS DE MANUTENÇÃO.....	25
2.4.1. MANUTENÇÃO CORRETIVA .....	25
2.4.2. MANUTENÇÃO PREVENTIVA.....	26
2.4.3. MANUTENÇÃO PREDITIVA .....	26
2.4.4. MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE .....	27
2.5. ANÁLISE DE DADOS DE VIDA.....	28
2.5.1. DISTRIBUIÇÕES DE VIDA.....	28
2.5.2. ESTIMATIVA DE PARÂMETROS.....	29
2.5.3. CÁLCULO DE RESULTADOS.....	31
2.5.4. LIMITES DE CONFIANÇA.....	32
2.5.5. TEMPO ÓTIMO DE MANUTENÇÃO.....	32
<b>3. ANÁLISE DE DADOS DE VIDA DE TURBO ALIMENTADORES.....</b>	<b>35</b>

3.1. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS .....	35
3.2. MODOS DE FALHA.....	36
3.2.1. FRATURA DA RODA QUENTE.....	37
3.2.2. PASSAGEM DE ÓLEO.....	39
3.2.3. DEMAIS MODOS DE FALHA .....	42
3.2.3.1. CUSTOS DE MANUTENÇÃO .....	46
3.2.3.1.1. <i>RELAÇÃO DE CUSTOS ENTRE CORRETIVA E PREVENTIVA</i> ....	46
3.2.3.1.2. <i>TEMPO ÓTIMO DE SUBSTITUIÇÃO PREVENTIVA</i> .....	46
<b>4. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>48</b>
4.1. ENTENDIMENTO DOS RESULTADOS POR MODO DE FALHA.....	48
4.1.1. FRATURA DA RODA QUENTE.....	48
4.1.2. PASSAGEM DE ÓLEO.....	48
4.1.3. DEMAIS MODOS DE FALHA .....	48
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>50</b>
5.1. TRABALHOS FUTUROS.....	50
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>52</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O cenário econômico em que a grande maioria das empresas brasileiras estão inseridas exige cada vez mais a busca pela competitividade e eficiência em todos os processos internos. No setor ferroviário a situação não é diferente, no qual surgiram no histórico recente frentes de trabalho focadas em otimizar e reduzir custos, tanto na operação quanto na manutenção e gestão dos ativos.

É função da Engenharia da Confiabilidade buscar a utilização eficiente dos recursos disponíveis alinhada com os objetivos estratégicos da empresa. Para isso são utilizadas ferramentas qualitativas e quantitativas, a fim de avaliar os processos de manutenção, as falhas dos ativos e as oportunidades internas, em busca de melhorias em todos os níveis da estratégia de manutenção.

Neste primeiro capítulo serão apresentadas as informações iniciais sobre o desenvolvimento deste trabalho, no que diz respeito à definição do tema, o problema que será estudado, sua justificativa, principais objetivos e estrutura sintetizada.

### 1.1. TEMA

A manutenção no setor ferroviário é um ponto crucial no combate às perdas de transporte, pois está fortemente ligada à disponibilidade dos ativos e ao bloqueio de falhas que podem impactar em toda a cadeia de trens. O desenvolvimento deste trabalho se dará em torno de um componente específico das locomotivas, o turbo alimentador, que apresenta alto nível de criticidade no sistema de combustão Diesel. Esta criticidade é devido ao risco de uma falha no componente poder impactar gravemente os demais sistemas da locomotiva, gerando danos severos e irreparáveis, com riscos inclusive ao operador e ao meio ambiente.

Para este componente serão estudadas as falhas e as atividades de manutenção vigentes, buscando através da análise de dados de vida, dos modos de falha recorrentes e das oportunidades de bloqueio das falhas o melhor plano de manutenção alinhado ao planejamento estratégico da empresa.

Como resultado do estudo serão construídas sugestões de manutenção envolvendo atividades de inspeção, análises preditivas e substituição preventiva quando viável.

## 1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A frota de locomotivas alvo do estudo é composta por 220 ativos. Possuem como fonte primária de energia um motor Diesel turbo alimentado de potência nominal igual a 4500 HP. O turbo alimentador possui agenda de substituição preventiva baseada na potência produzida pelo motor em MWh. A fim de facilitar o controle da manutenção com os dados disponíveis das locomotivas, esta substituição preventiva é controlada pelo consumo de Diesel do ativo. A conversão é feita através da quantidade média de combustível gasta para produzir um MWh na frota em questão.

Os dados de vida analisados foram acumulados ao longo de 4 anos de operação das locomotivas por meio de *inputs* manuais em um sistema informatizado de manutenção, contemplando substituições preventivas e falhas por motivos diversos.

Estes dados de falhas e substituições preventivas devem ser estudados e validados para garantir a qualidade da informação e as falhas devem ser segregadas em quantas categorias forem necessárias.

Analisando o comportamento de cada modo de falha foram elaboradas propostas para intervenções preventivas ou preditivas que melhor atuem na mitigação das falhas, sem onerar o custo total do ciclo de vida do componente.

## 1.3. JUSTIFICATIVA

A escolha deste estudo específico está relacionada a diversos fatores que estão interligados entre si. Como fatores principais é possível citar a busca pela segurança operacional aliada à eficiência de custos e previsibilidade de manutenção.

A substituição preventiva de turbos apresenta um valor significativo no custo total da manutenção das locomotivas, aproximadamente R\$7.500,00 por locomotiva por ano, e suas falhas acarretam significativos impactos operacionais e de disponibilidade. Dessa forma, a otimização desse processo de manutenção está totalmente alinhada com a estratégia organizacional vigente.

#### 1.4. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho foram separados em um objetivo geral e outros específicos, que serão citados a seguir.

##### 1.4.1. Objetivo Geral

Propor estratégias para a manutenção do turbo alimentador a partir do conhecimento do comportamento das suas falhas ao longo da vida visando reduzir custos e riscos operacionais.

##### 1.4.2. Objetivos Específicos

Os seguintes objetivos específicos devem ser atingidos para buscar a conclusão do objetivo geral:

- Conhecer e estudar os tipos e modos de falhas do componente analisado (turbo alimentador);
- Levantar dados de vida e traçar curvas de confiabilidade e probabilidade de falha;
- Avaliar oportunidades de bloqueio para causas específicas das falhas;
- Buscar um ponto ótimo de substituição preventiva, caso esse tipo de manutenção se mostre viável.

## 1.5. METODOLOGIA

Este trabalho envolve pesquisa científica aplicada, pois será preciso pesquisar e estudar os meios de operação e manutenção de turbo alimentadores, acumulando dados relacionados a falhas, tempos e custos de manutenção para gerar análises quantitativas que fornecerão informações importantes para o aprimoramento da estratégia de manutenção.

Quanto à natureza, a pesquisa é do tipo aplicada, pois gera produtos e processos com finalidades imediatas, utilizando conhecimentos da pesquisa básica adicionados às tecnologias existentes, devido a uma necessidade preestabelecida (JUNG, 2003).

Em relação aos objetivos, a pesquisa é do tipo explicativa, pois visa identificar fatores que contribuem para a ocorrência de determinados fenômenos, ou seja, explica o “porquê das coisas”. Tem como objetivo definir leis mais amplas, relacionar e gerar novas hipóteses através de dedução lógica (JUNG, 2003).

Quanto aos procedimentos, essa pesquisa pode ser definida como bibliográfica, pois foi procurado conhecer as diferentes formas de contribuição que se realizaram sobre o assunto, documental, porque foi necessário conhecer os diversos tipos de documentos sobre a área de conhecimento, além de ser um estudo de caso, por focar em um caso em particular, levantando características e parâmetros de funcionamento e operação de um sistema (JUNG, 2003).

A metodologia de pesquisa foi dividida em 4 partes. Inicialmente será revisada a teoria sobre mecânica de locomotivas e o funcionamento do turbo alimentador, além de conceitos básicos dos principais tipos de manutenção, Engenharia da Confiabilidade e análise de dados de vida. Em seguida será aprofundado o conhecimento dos modos de falha do componente estudado (turbo alimentador) e os tipos de manutenção vigentes no sistema, através de contato com equipe especializada e leitura de manuais e procedimentos de manutenção. A etapa seguinte compreende a coleta de dados de vida e a elaboração de análises desses dados com o auxílio de um software especialista (Reliasoft Weibull++). Posteriormente serão analisados os resultados das análises e traçadas propostas estratégias eficientes para garantir os objetivos propostos. Finalmente, na última etapa, serão expostas as conclusões sobre o trabalho.

## 1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

A partir do capítulo seguinte, o presente trabalho estará estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 2: Referencial teórico de mecânica de locomotivas e Engenharia da Confiabilidade - Descrição do ativo (locomotiva), decomposição até o nível do componente alvo do estudo (turboalimentador) e definições das ferramentas de confiabilidade relacionadas ao tema proposto (Análise de Dados de Vida), além das técnicas de manutenção aplicáveis no setor;
- Capítulo 3: Aplicação dos conceitos de Engenharia da Confiabilidade no componente explanado no capítulo 2;
- Capítulo 4: Resultados da aplicação dos conceitos explicada no capítulo 3 e soluções encontradas.
- Capítulo 5: Dificuldades enfrentadas ao longo do desenvolvimento do trabalho, além de possíveis aplicações para trabalhos futuros e demais conclusões relacionadas;

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo trata nas seções seguintes algumas definições sobre mecânica de locomotivas, bem como sobre a engenharia da confiabilidade. O ativo (locomotiva) será decomposto até o nível do componente em estudo (turbo alimentador) e será descrita relação deste com todos os sistemas do ativo.

As ferramentas de engenharia da confiabilidade aplicadas neste trabalho serão descritas e os tipos de manutenção utilizados no setor ferroviário serão resumidos.

### 2.1. A LOCOMOTIVA

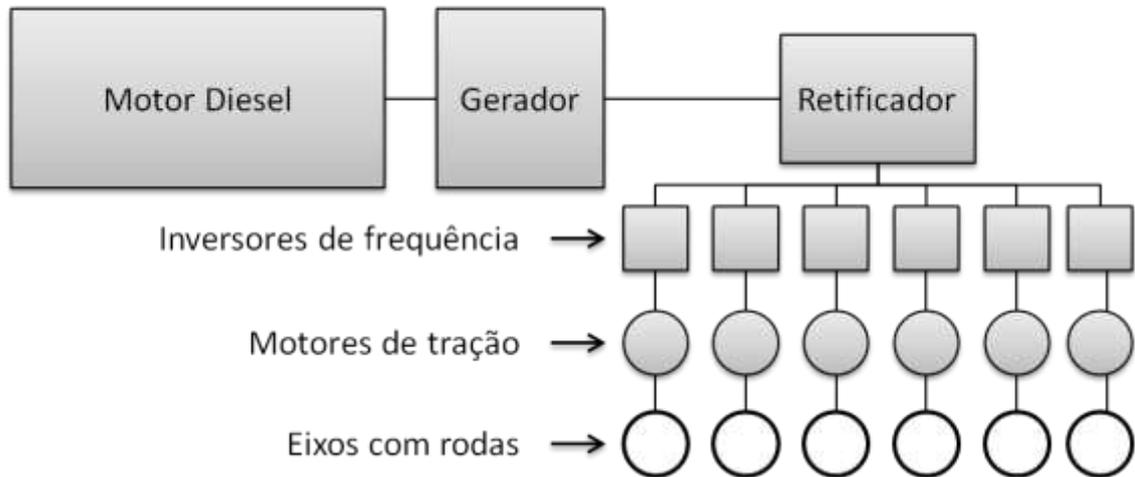
O maior nível do sistema em estudo é uma locomotiva Diesel-Elétrica, que possui como fonte primária de energia um motor diesel, o qual aciona um gerador de corrente alternada que produzirá energia elétrica posteriormente retificada e controlada por inversores de frequência para alimentar os motores de tração. Estes motores de tração são acoplados aos eixos com rodas através de engrenagens e permitem transmitir o esforço mecânico para as rodas da locomotiva.

O motor diesel passou a ser utilizado em ferrovias a partir de 1934, 37 anos após a construção do primeiro motor desse gênero. O sistema de transmissão elétrico se sobrepôs sobre os demais (mecânico e hidráulico) principalmente pelas aplicações em grandes potências, acima de 2000 HP (BRINA, 1988).



**Figura 1** – Locomotiva Diesel Elétrica  
Fonte: Autoria própria

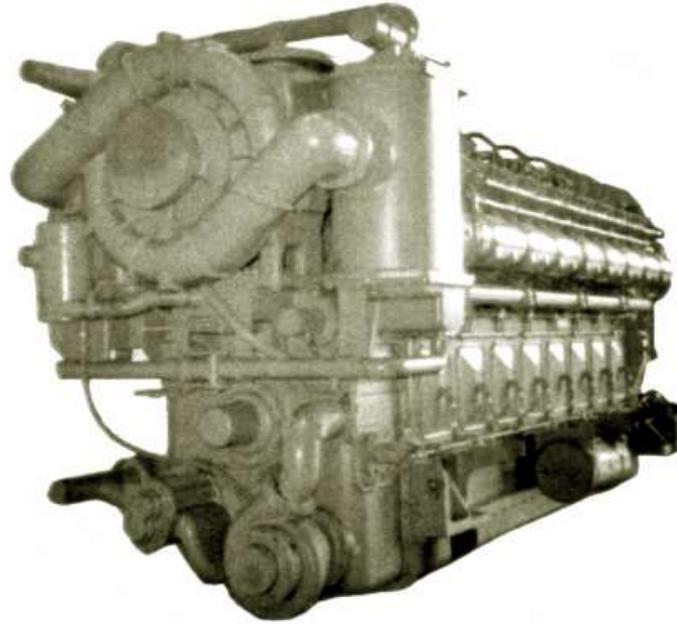
A figura 1 mostra a visão externa de uma locomotiva e a figura 2 apresenta um diagrama funcional da transmissão de energia citada.



**Figura 2** – Diagrama funcional da transmissão de energia em uma locomotiva Diesel Elétrica  
Fonte: Autoria própria

### 2.1.1.Motor Diesel

O motor da locomotiva em estudo é um motor de combustão interna com ignição por compressão a pistão. A compressão de uma massa de ar gera elevação da temperatura e pressão, que é utilizada para inflamar o combustível (diesel), introduzido próximo ao ponto superior de compressão do pistão. Os gases resultantes da combustão da mistura ar+combustível forçam o pistão para baixo girando o eixo virabrequim, permitindo a geração de trabalho no eixo. Um exemplo de motor diesel pode ser visualizado na figura 3 (BORBA, 2001).



**Figura 3 – Motor Diesel**  
Fonte: Borba (2001, p. 118)

Este motor possui 16 cilindros dispostos em V a 45°, potência de 4.500 hp a 1.050 rpm. A figura 4 mostra uma visão em corte do motor. A disposição dos cilindros em V é preferida em locomotivas, devido à economia de peso e espaço (BRINA, 1988).

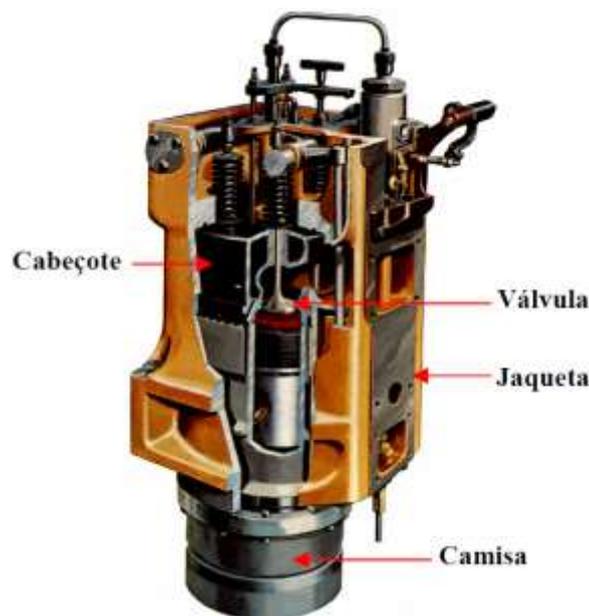


**Figura 4 – Motor Diesel em corte**  
Fonte: Borba (2001, p. 118)

Serão citados a seguir alguns dos principais componentes do motor diesel.

### 2.1.2. Conjunto de Força

As principais partes do conjunto de força são a jaqueta, camisa, cabeçote, pistão e biela, que são identificados na figura 5.



**Figura 5** – Conjunto de força  
Fonte: Borba (2001, p. 122)

A combustão ocorre dentro da camisa, que fica instalada no interior da jaqueta, a qual tem a função de manter a estrutura e promover o arrefecimento da camisa.

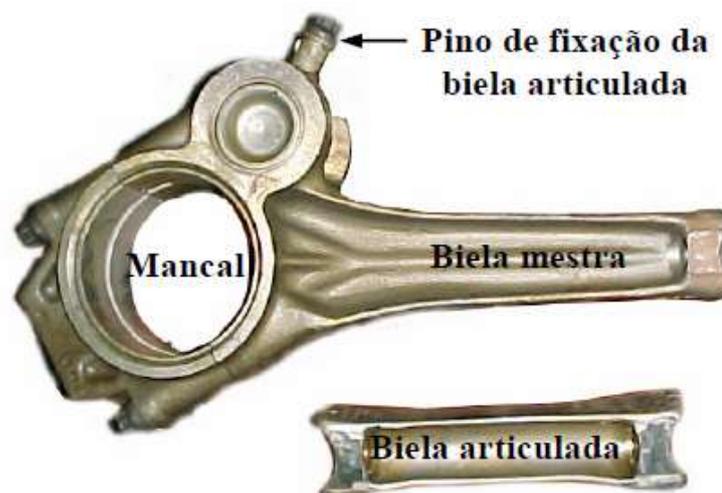
Nos motores de 4 tempos, como o em estudo, o cabeçote é montado junto com a camisa no interior da jaqueta, aloja as válvulas de admissão e exaustão, além do bico injetor de combustível. Na sua parte inferior está localizada a câmara de combustão, que é o local onde é pulverizado o óleo diesel.

Fechando a câmara de combustão pelo lado inferior está o pistão, composto pela coroa, que suporta temperaturas mais altas e por isso está localizada na parte superior, e a saia, que é ligada à biela através de um pino (BORBA, 2001). A figura 6 mostra um exemplo de pistão e suas partes.



**Figura 6 – Pistão**  
 Fonte: Borba (2001, p. 124)

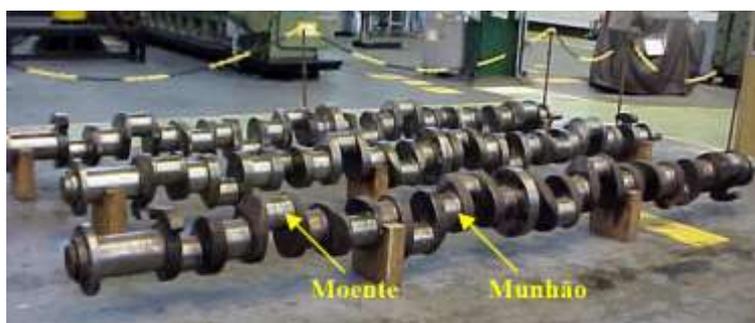
A biela tem a função de transferir a força produzida no pistão de forma ascendente / descendente ao virabrequim, que produz movimento rotativo. Nos motores em V as bielas são instaladas em pares: uma biela mestra, acoplada ao virabrequim pelo mancal, e uma articulada, acoplada à mestra por meio de um pino. Ambas são mostradas na figura 7.



**Figura 7 – Bielas**  
 Fonte: Borba (2001, p. 122)

### 2.1.3. Virabrequim

O eixo virabrequim, também conhecido como eixo de manivelas, possui munhões e moentes, apresentados na figura 8, que suportam o torque proveniente dos conjuntos de força e convertem o movimento vertical destes em rotacional (BORBA, 2001).



**Figura 8** – Eixo Virabrequim  
Fonte: Borba (2001, p. 120)

## 2.2. TURBO ALIMENTADOR

Para que seja realizada a queima do combustível no interior do conjunto de força deve ser fornecido ar através da admissão. Este ar é captado do ambiente externo através do turbo alimentador, que é montado em uma das extremidades do motor diesel. O ar é captado pela abertura frontal mostrada na figura 9.

Este componente é um compressor de ar centrífugo movido por uma turbina de fluxo axial. A turbina é acionada pela energia presente nos gases de exaustão do motor antes de ser descarregado para atmosfera pela chaminé. As duas principais funções do turbo alimentador são:

- Fornecer ar comprimido para os conjuntos de força pela admissão a uma pressão superior à atmosférica (cerca de 50%), permitindo uma queima maior de combustível e um maior rendimento do motor (BRINA, 1988).
- Expulsar os gases resultantes da combustão e resfriar o pistão e as peças do conjunto. Isso acontece em um período do ciclo de

combustão em que as válvulas de admissão e exaustão estão abertas simultaneamente, momento conhecido como “cruzamento de válvulas” (BORBA, 2001).



**Figura 9 – Turbo Alimentador**  
Fonte: TAAM LOCOMOTIVE ARYA (2016)

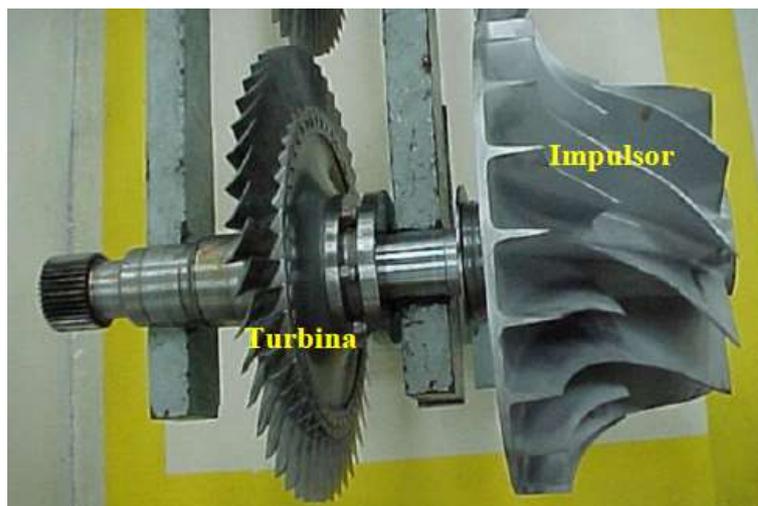
Os subcomponentes do turbo serão tratados nas seções seguintes.

#### 2.2.1. Conjunto do Alojamento da Turbina

O conjunto de alojamento da turbina contempla o alojamento da turbina, seus rolamentos e vedações. É instalado na tampa dianteira do motor por meio de parafusos. Os demais subconjuntos são instalados neste alojamento.

#### 2.2.2. Conjunto do Rotor

O conjunto do rotor apresentado na figura 10 é composto basicamente pelo disco da turbina (roda quente), eixo e impulsor (roda fria). Esse conjunto gira nos rolamentos do conjunto de alojamento da turbina.



**Figura 10** – Conjunto do Rotor  
Fonte: Borba (2001, p. 138)

### 2.2.3. Conjunto de Entrada da Turbina

O conjunto de entrada da turbina consiste em uma flange de admissão da turbina, cobertura da turbina, uma peça do nariz, juntas, anéis e retentores. A cobertura e o flange de admissão são aparafusados ao alojamento da turbina.

### 2.2.4. Conjunto do Alojamento do Compressor

O conjunto do alojamento do compressor possui na sua estrutura o alojamento da descarga do compressor, a entrada do compressor e o difusor. Esse conjunto é instalado na extremidade do compressor do alojamento da turbina e pode ser visualizado na figura 8.

### 2.2.5. Interface com os Sistemas da Locomotiva

O turbo alimentador é ligado a locomotiva por meio dos sistemas que serão listados a seguir.

#### 2.2.5.1. Óleo lubrificante

O turbo alimentador utiliza o mesmo óleo que atua no arrefecimento e lubrificação do motor diesel, compartilhando com este a mesma fonte. O óleo é captado e conduzido através de tubos e conexões até o alto do alojamento da turbina. Após resfriar e lubrificar os rolamentos da turbina o óleo desce por gravidade pelas passagens no alojamento e retorna para o cárter do motor.

#### 2.2.5.2. Gases de escape

Um coletor concentra os gases expelidos no escape do motor diesel pelos conjuntos de força e os direciona para a extremidade da turbina do turbocompressor. Após girar a turbina os gases passam pelo coletor de escape no alojamento da turbina e são lançados na atmosfera.

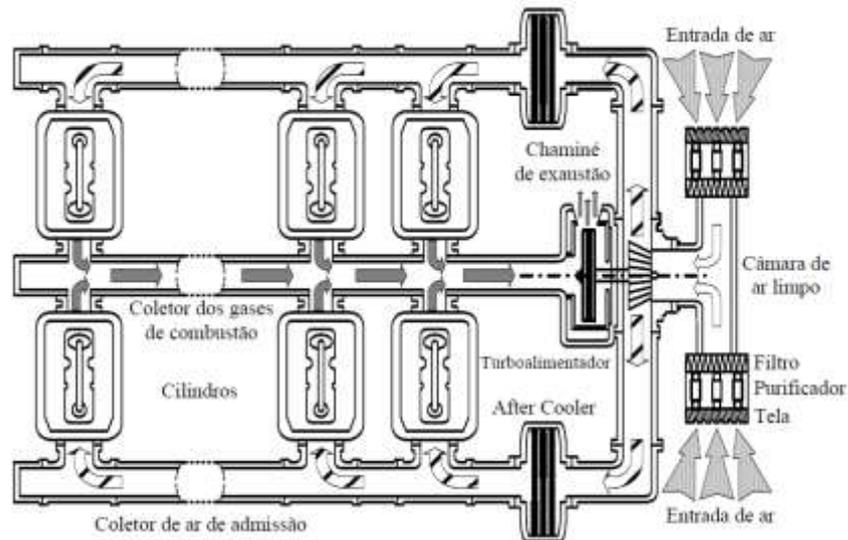
#### 2.2.5.3. Ar do motor

O ar do motor é admitido por meio de um conjunto de filtros e telas até chegar ao compressor do turbo, que como o próprio nome diz, comprime o ar e o direciona para as duas saídas do alojamento do compressor. Essa compressão aquece o ar e este deve ser resfriado através de resfriadores de ar. Este processo aumenta a densidade do ar antes da entrada na admissão do motor diesel, onde executa a combustão e resfriamento.

A figura 11 demonstra a relação do turbo alimentador com os sistemas de ar do motor e gases de escape.

#### 2.2.5.4. Água de arrefecimento

Assim como o óleo lubrificante, a água usada para arrefecimento do turbo é a mesma utilizada no motor diesel. Após ser captado pela bomba d'água, o líquido circula por passagens no alojamento da turbina e retorna através de tubos coletores para o sistema de água da locomotiva.



**Figura 11** – Interface do turbo com os sistemas de ar e gases de escape do motor  
 Fonte: Borba (2001, p. 139)

#### 2.2.5.5. Ar de vedação

O sistema de ar de vedação utiliza uma porção do ar comprimido gerado pelo compressor, direcionando-o para o lado externo das vedações de óleo. Esse ar pressurizado trabalha como uma barreira, diminuindo o escape de óleo nas vedações.

Este ar também atua resfriando o conjunto do disco da turbina, produzindo uma força sobre as lâminas do disco da turbina, equilibrando as forças produzidas pelo ar de escape do motor e o compressor.

### 2.3. INTRODUÇÃO A ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

A engenharia de confiabilidade fornece ferramentas teóricas e práticas para definir a probabilidade e capacidade de que um determinado produto, ativo ou sistema irá desempenhar sua função requerida sem falhas, por um determinado período de tempo, segundo condições específicas e com um dado nível de confiança.

A avaliação da engenharia de confiabilidade é baseada nos resultados de testes ou dados relativos à performance do produto em operação. Os dados

produzidos são usados para medir com precisão e promover melhorias na confiabilidade de um bem que está sendo produzido ou recebendo manutenção. Isso é particularmente importante no atual cenário econômico em que as empresas estão inseridas, no qual é grande o apelo pela redução de custos. É comum a intenção de cortar gastos em um primeiro momento por meio da aquisição de itens mais baratos ou reduzindo etapas de testes. Porém, itens mais baratos são geralmente menos confiáveis e realizando menos testes podem ser colocados em operação produtos com falhas não mapeadas. Essa redução de custos em curto prazo pode provocar grandes perdas no médio e longo prazo, além da perda da confiança do consumidor (RELIASOFT, 2015).

Todos os fatores envolvidos – confiabilidade, custos, vendas, satisfação do cliente, entre outros – devem ser balanceados de forma ótima, alinhados ao planejamento estratégico da empresa.

## 2.4. TIPOS DE MANUTENÇÃO

### 2.4.1. Manutenção Corretiva

De acordo com a Norma NBR 5462 (1994), manutenção corretiva é “a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida”. O objetivo deste tipo de manutenção é corrigir as falhas nos produtos ou equipamentos a fim de restabelecer sua função, trabalhando por natureza de forma reativa. A manutenção corretiva é a mais antiga e até hoje muito utilizada, podendo ser verificada em qualquer empresa que possua ativos físicos, em qualquer nível de planejamento da manutenção. Intervenções corretivas são difíceis de prever devido ao comportamento estocástico das falhas dos equipamentos e as paradas de produção se tornam imprevisíveis (KOBACY, 2008).

Este tipo de manutenção resulta normalmente em custos elevados, pois a falha inesperada pode gerar grandes perdas na produção. Intervenções corretivas normalmente são mais demoradas, o que acontece no caso de manutenção de ativos como locomotivas, uma vez que existe uma logística operacional diferenciada

para recolher o veículo em oficina para efetuar os reparos necessários. A falha, por ser inesperada, pode gerar perdas de produção e redução do nível de serviço. Além disso, gera incerteza quanto à segurança e ao estoque de itens de reposição, promovendo acréscimos aos custos de manutenção (LIMA, 2006).

#### 2.4.2. Manutenção Preventiva

O principal propósito da Manutenção Preventiva é a substituição de peças ou subcomponentes antes de atingir a idade em que começam a oferecer maior risco de quebra. Esta manutenção pode ser baseada em dados estatísticos, capazes de estimar a vida útil dos componentes com base em um banco de eventos de falhas. A partir da informação da taxa de falhas dos componentes é possível criar um plano de substituição dos equipamentos ou sistemas ao longo do tempo, priorizando o custo ótimo de manutenção, assunto que será tratado posteriormente.

A Manutenção Preventiva procura atuar antes da ocorrência efetiva da falha, ao contrário da manutenção corretiva. A definição da NBR 5462(1994) para a Manutenção Preventiva é “manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritivos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item”.

Apesar de proporcionar um conhecimento prévio das ações, permitindo um bom gerenciamento dos processos de manutenção e recursos, além da previsibilidade de consumo de matérias, a manutenção preventiva promove a retirada do equipamento de operação para a execução das atividades programadas. Dessa forma, esse tipo de manutenção sofrerá questionamentos sobre sua aplicação quando o conjunto de fatores não for suficientemente forte em seu favor (KARDEC, 2009).

#### 2.4.3. Manutenção Preditiva

A Manutenção Preditiva é considerada uma forma mais evoluída da Manutenção Preventiva. Por meio da análise de determinados parâmetros dos sistemas é possível estabelecer a previsão de falhas próximas. Acompanhando

sistematicamente as variáveis relacionadas ao desempenho dos equipamentos, pode-se definir a necessidade de intervenção no sistema.

Este tipo de manutenção apresenta bom retorno quanto à disponibilidade, uma vez que as medições e verificações são feitas com o equipamento em funcionamento. É muito importante que a mão de obra utilizada nesse tipo de manutenção seja bem treinada, pois não basta medir valores, devendo também ser realizadas análises e formular diagnósticos (KARDEC, 2009).

A manutenção preditiva, que pode utilizar sensoriamento remoto, termografia, análise de vibrações ou outras técnicas, quando viável, deve ser utilizada, pois permite que substituições de peças e reparos sejam feitos exatamente quando necessários (FOGLIATTO, 2009).

#### 2.4.4. Manutenção Centrada em Confiabilidade

A Manutenção Centrada em Confiabilidade – MCC, consiste em uma definição simples, em entender quais são as principais fontes de falhas, com o objetivo de se antecipar à sua ocorrência. Ao identificar uma falha, são listados e investigados todos os eventos que a provocaram ou podem provocar. Esses eventos são chamados “modos de falha” e são organizados em listas. Para ampliar a compreensão dos possíveis modos de falha, é necessário registrar não só as falhas causadas por deterioração ou desgaste normal do componente, mas também as falhas de projeto e as provocadas por erros humanos, ou seja, por parte dos operadores e mantenedores por falta de atenção, despreparo ou falta de treinamento (MOUBRAY, 2000).

A MCC está direcionada principalmente para questões como confiabilidade e segurança operacional, buscando sua maximizar esses pontos através do planejamento, focando sempre na função do sistema. Além disso, busca também reduzir os custos e os impactos ambientais.

A condução da MCC segue as seguintes perguntas:

- Quais as funções do sistema/equipamento e os padrões de desempenho associados?
- Como o sistema pode falhar ao realizar essas funções?
- O que pode causar a falha funcional?

- O que acontece quando uma falha ocorre?
- De que forma cada falha importa (quais as suas consequências)?
- O que pode ser feito para detectar e prevenir a ocorrência da falha?
- O que deverá ser feito se uma tarefa de manutenção não pode ser identificada? (MOUBRAY, 2000).

A MCC pode utilizar determinadas ferramentas da engenharia de confiabilidade no auxílio de seu desenvolvimento, que serão tratadas na seção a seguir.

## 2.5. ANÁLISE DE DADOS DE VIDA

A Análise de Dados de Vida se refere ao estudo e modelagem de dados a partir da observação da vida de um determinado produto. Entende-se como “vida” o tempo de operação do ativo, podendo ter seu fim em uma falha, em uma substituição preventiva no término do período de estudo. Essas duas últimas possibilidades são chamadas de “suspensões”. A vida do ativo pode ser medida em horas, quilômetros, energia produzida, ciclos de operação ou outras métricas relacionadas à exposição do item ao longo de sua vida. Essas medições podem ser englobadas no termo Dados de Vida. As análises realizadas e conclusões alcançadas com esses dados são chamadas Análises de Dados de Vida.

Ao realizar análises de dados de vida são feitas previsões sobre a vida de toda uma população ajustando uma distribuição ou modelo aos dados coletados de uma amostra representativa dessa população. A distribuição parametrizada para esse conjunto de dados pode ser usada para estimar características do produto, como a confiabilidade e a probabilidade de falha em um determinado tempo, a taxa de falhas, vida média, entre outros (RELIASOFT, 2015).

### 2.5.1. Distribuições de Vida

Distribuições estatísticas foram desenvolvidas por matemáticos, engenheiros e estatísticos com o objetivo de modelar matematicamente ou representar com números determinado comportamento. A Função Densidade de Probabilidade

(Probability Density Function) - em inglês, *pdf* – é uma função matemática que descreve a distribuição. A *pdf* pode ser representada matematicamente ou graficamente. No caso gráfico, o eixo-x representa o tempo na vida do componente ou produto.

A *pdf* de uma Weibull tri-paramétrica é dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Onde:

$$f(t) \geq 0, t \geq 0 \text{ ou } \gamma$$

$$\beta > 0$$

$$\eta > 0$$

$$-\infty < \gamma < +\infty$$

E:

$\beta$  = Parâmetro de forma

$\eta$  = Parâmetro de escala

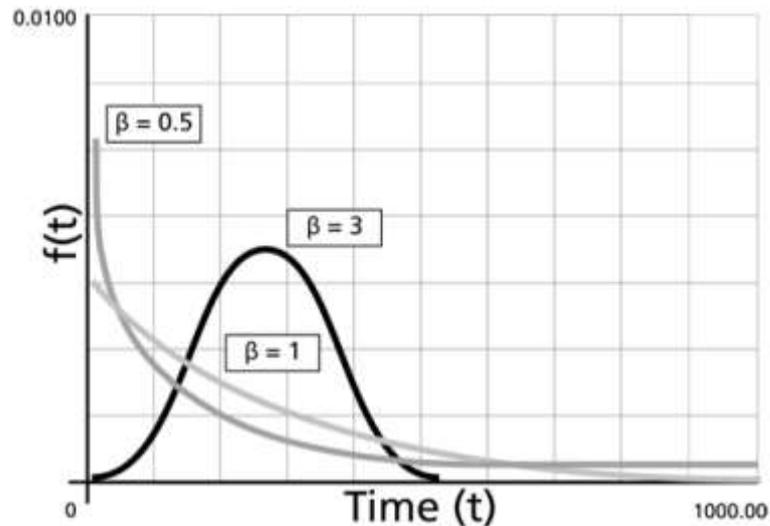
$\gamma$  = Parâmetro de localização

Algumas distribuições, como a Weibull e a Lognormal, tendem a representar melhor os dados de vida e são comumente chamadas de “distribuições de vida”. Esse tipo de análise inclusive é muito conhecida como “análise de Weibull”, devido à distribuição de Weibull, muito flexível para esses propósitos. Essa distribuição pode se apresentar nas formas mono-paramétrica, bi-paramétrica ou tri-paramétrica. Outras distribuições muito usadas são a normal e a exponencial. O responsável pela análise pode escolher o modelo mais adequado através de testes de aderência ou do seu conhecimento prévio sobre o item em estudo (RELIASOFT, 2015).

### 2.5.2. Estimativa de Parâmetros

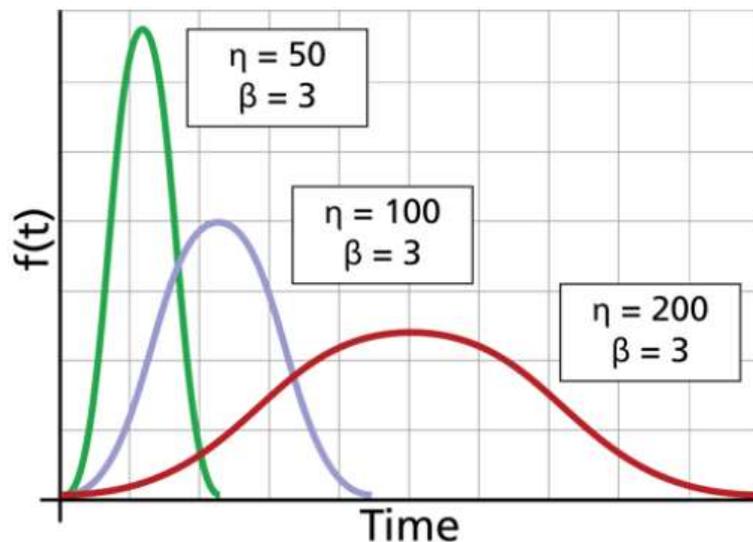
Para ajustar um modelo a um determinado conjunto de dados, é possível variar os parâmetros da distribuição de vida que deixarão a função com o ajuste mais próximo dos dados. Os parâmetros controlam o formato, a escala e a posição da função *pdf*. Por exemplo, para a Weibull tri-paramétrica mostrada na seção anterior,  $\beta$ , o parâmetro de forma, define o formato que a distribuição irá assumir.

Valores de  $\beta$  menores do que 1 se adequam a populações com alta taxa de falhas no início da vida (falhas prematuras).  $\beta$  igual a 1 pode ser encontrado em populações com taxa de falhas constante ao longo da vida.  $\beta$  maior do que 1 se apresenta em populações com taxa de falhas crescente no tempo. A figura 12 mostra o efeito da variação de  $\beta$  na curva de densidade de probabilidade (FOGLIATTO, 2009).



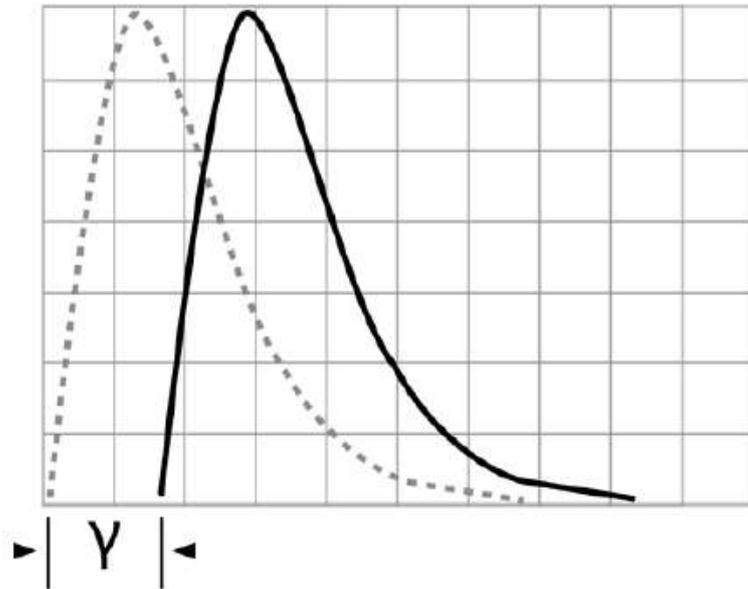
**Figura 12** – Efeito da variação do parâmetro  $\beta$  na distribuição Weibull  
Fonte: RELIASOFT (2015) p. 106

O parâmetro de escala -  $\eta$ , define a posição da massa de dados. Quanto maior o valor de  $\eta$ , maior será o tempo para falhar dos ativos analisados. Isso pode ser visualizado na figura 13.



**Figura 13** – Efeito da variação do parâmetro  $\eta$  na distribuição Weibull  
Fonte: RELIASOFT (2015) p. 2

O parâmetro de localização -  $\gamma$ , modifica a posição da distribuição no tempo. É utilizado em análises onde o ativo pode permanecer um tempo determinado sem nenhuma falha ( $\gamma$  positivo) ou já possui probabilidade de falha no tempo igual a zero ( $\gamma$  negativo). O efeito da variação de  $\gamma$  é mostrado na figura 14.



**Figura 14** – Efeito da variação do parâmetro  $\gamma$  na distribuição Weibull  
Fonte: RELIASOFT (2015) p. 17)

Vários métodos foram desenvolvidos para estimar os parâmetros mais adequados para uma distribuição. Entre os mais conhecidos é possível citar a plotagem de probabilidade, a regressão sobre o eixo x (RRX), regressão sobre o eixo y (RRY) e a estimativa da máxima verossimilhança (MLE). O método de análise mais apropriado vai depender do conjunto de dados e, em alguns casos, da distribuição escolhida (RELIASOFT, 2015).

### 2.5.3. Cálculo de Resultados

Após definir os parâmetros que dão o melhor ajuste ao seu conjunto de dados, é possível obter uma grande variedade de gráficos e resultados que descrevem o objeto em estudo, o que inclui:

- Confiabilidade no tempo: a probabilidade de que o item irá desempenhar sua função sem falhas até um determinado tempo;

- Probabilidade de falha no tempo: a probabilidade de que o item não irá desempenhar sua função (irá falhar) até um determinado tempo;
- Vida média: A expectativa de tempo médio de vida que a população terá até uma falha. Também conhecido como MTTF (*Mean Time To Failure*);
- Taxa de falha: A expectativa do número de falhas por unidade de tempo;
- Gráfico Confiabilidade x Tempo: um gráfico que mostra a variação (redução) da confiabilidade ao longo do tempo;
- Gráfico da *pdf*: o gráfico da função de densidade de probabilidade;
- Taxa de Falha x Tempo: um gráfico da variação da taxa de falhas ao longo do tempo;
- Gráfico de contorno: a representação gráfica das soluções possíveis para a razão de verossimilhança. É utilizada para comparações entre dois conjuntos de dados (RELIASOFT, 2015).

#### 2.5.4.Limites de Confiança

Como os resultados de análises de dados de vida são estimativas baseadas na observação de tempos de vida de uma amostra, existe uma incerteza sobre os resultados devido às amostragens limitadas. Os limites de confiança são utilizados para quantificar essa incerteza devido à amostragem, expressando a confiança de que um intervalo contém uma quantidade específica de probabilidade.

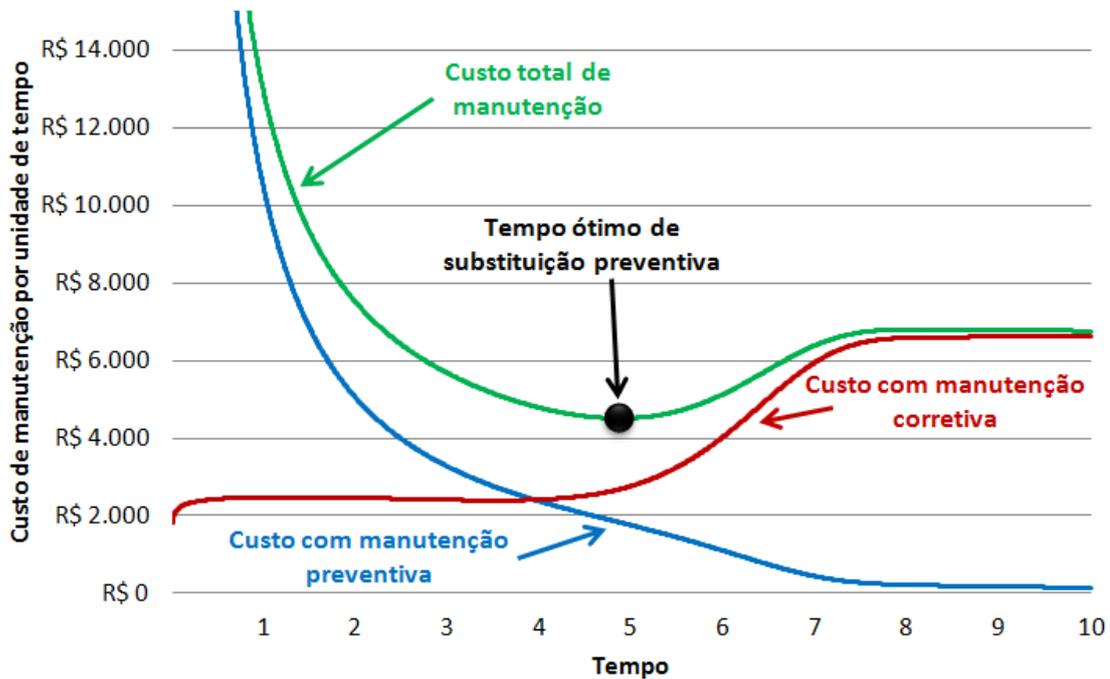
Limites de confiança podem ser unilaterais ou bilaterais. Os unilaterais são usados para expressar que quantidade de informação está acima do limite inferior ou abaixo do superior. Limites bilaterais são usados para indicar que a quantidade indicada está entre os limites superior e inferior (RELIASOFT, 2015).

#### 2.5.5.Tempo Ótimo de Manutenção

A partir das informações de confiabilidade e probabilidade de falha ao longo do tempo é possível estimar o volume de manutenções corretivas que serão realizadas ao longo da vida do item que está sendo estudado e o custo anual

equivalente dessas falhas. Caso seja definido um período de substituição preventiva, também é possível calcular os custos estimados com essa substituição.

A partir dessas informações, pode-se chegar a um tempo ótimo de substituição preventiva, que minimiza o custo total do ciclo de vida do componente, como mostrado na figura 15.



**Figura 15** – Tempo ótimo de substituição preventiva  
Fonte: Autoria própria

O ponto ótimo de substituição preventiva é definido através do valor mínimo resultante da soma dos custos de manutenção preventiva e corretiva, representados nas linhas azul e vermelha da figura 15, respectivamente. Por um lado, quanto menor for o intervalo entre substituições, maior será o gasto com a preventiva. Por outro lado, se o intervalo for demasiadamente postergado, os custos decorrentes de falhas se elevarão.

Através dos valores gastos com componentes, mão de obra e lucro cessante, além dos dados de confiabilidade e a probabilidade de falha do componente, é possível definir uma equação que resulta no custo total de manutenção:

$$CPUT(x) = \frac{C_p \cdot R(x) + C_c \cdot (1 - R(x))}{\int_0^x R(t) dt}$$

Onde:

$CPUT$  = Custo total por unidade de tempo

$C_p$  = Custo da manutenção preventiva

$C_c$  = Custo da manutenção corretiva

$R(x)$  = Função de confiabilidade

O intervalo ótimo de substituição preventiva será o valor de  $x$  que minimiza  $CPUT$  (RELIAWIKI, 2016).

### 3. ANÁLISE DE DADOS DE VIDA DE TURBO ALIMENTADORES

Este capítulo apresenta a aplicação dos conceitos de engenharia da confiabilidade, com foco na análise de dados de vida, no componente turbo alimentador, alvo deste estudo. Será analisado o comportamento das falhas ao longo do tempo para distintos modos de falha, para que sejam propostas estratégias de manutenção capazes de mitigá-las, juntamente com seus efeitos.

#### 3.1. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados de vida agrupados para os turbo alimentadores tem origem em um relatório de movimentação de componentes. Cada instalação ou desinstalação é registrada no sistema de manutenção e inserida a informação do motivo da retirada, como mostrado no quadro 1.

A substituição preventiva é definida pela utilização da locomotiva. Essa utilização é medida em MWh produzidos pelo motor diesel. Não é possível realizar um acompanhamento diário do MWh produzido, mas o abastecimento de diesel dos ativos é controlado diariamente. Dessa forma, foi definida uma relação Litros x Megawatt-hora para que a vida dos componentes das locomotivas seja controlada baseada no consumo de diesel.

Cada substituição corretiva recebe a informação do motivo da remoção em oficina (causa da falha na locomotiva). O turbo é então transferido para uma seção de recuperação de componentes, onde o mesmo é inspecionado e a causa da falha no componente é definida.

Foram segregados dois modos de falha mais recorrentes para análise pontual – fratura da roda quente e vazamento de lubrificante – e os demais foram agrupados por apresentar baixa recorrência individual e consequências semelhantes para a locomotiva.

Número de série	Data da transação	Tipo de transação	Numero da visita	Ativo	Sumário	Tipo de remoção
000000012	30/09/2013	Instalado	294384	907257		
000000013	21/10/2013	Instalado	316432	907240		
000000013	05/11/2014	Removido	364872	907240	Loco Acidentada	Não Programado
000000014	21/06/2013	Instalado	266474	903482		
000000016	28/01/2014	Instalado	356293	907210		
000000018	12/07/2013	Instalado	266539	907223		
000000018	24/07/2013	Removido	291173	907223	Roda compressora com eixo fraturado	Não Programado
000000019	31/05/2013	Instalado	266472	903424		
000000019	04/09/2014	Removido	377064	903424	Vazamento de óleo	Não Programado
000000020	03/10/2013	Instalado	294335	903423		
000000022	18/10/2012	Instalado	163994	903431		
000000022	06/05/2014	Removido	366855	903431	Recall	Não Programado
000000023	16/10/2012	Instalado	163970	903477		
000000023	11/03/2015	Removido	406232	903477	Substituição preventiva	Programado
000000024	26/06/2012	Instalado	163187	903419		
000000024	01/02/2013	Removido	191455	903419	Substituição preventiva	Programado
000000037	29/04/2016	Instalado	522453	903441		
000000086	05/03/2013	Instalado	191452	903417		
000000086	08/05/2016	Removido	519384	903417	Parafuso de fixação do caracol quebrado	Não Programado
000000087	20/03/2012	Instalado	112701	903452		
000000087	16/07/2014	Removido	376943	903452	Substituição preventiva	Programado
000000088	30/04/2015	Instalado	453627	907302		
000000088	25/11/2015	Removido	487992	907302	Substituição preventiva	Programado

**Quadro 1** – Relatório de origem dos dados de vida  
Fonte: Autoria própria

As falhas envolvendo a fratura da roda quente e as dos demais modos de falha agrupados (excesso vazamento de óleo) produzem consequências severas para o ativo, como a contaminação ou danificação dos resfriadores de ar e dos subcomponentes do motor diesel (principalmente os conjuntos de força). Isso acarreta manutenções mais caras, devido à substituição de mais componentes avariados e apropriação de mais mão de obra na execução das atividades (Hh).

As análises de cada modo de falha serão descritas nas seções a seguir.

### 3.2. MODOS DE FALHA

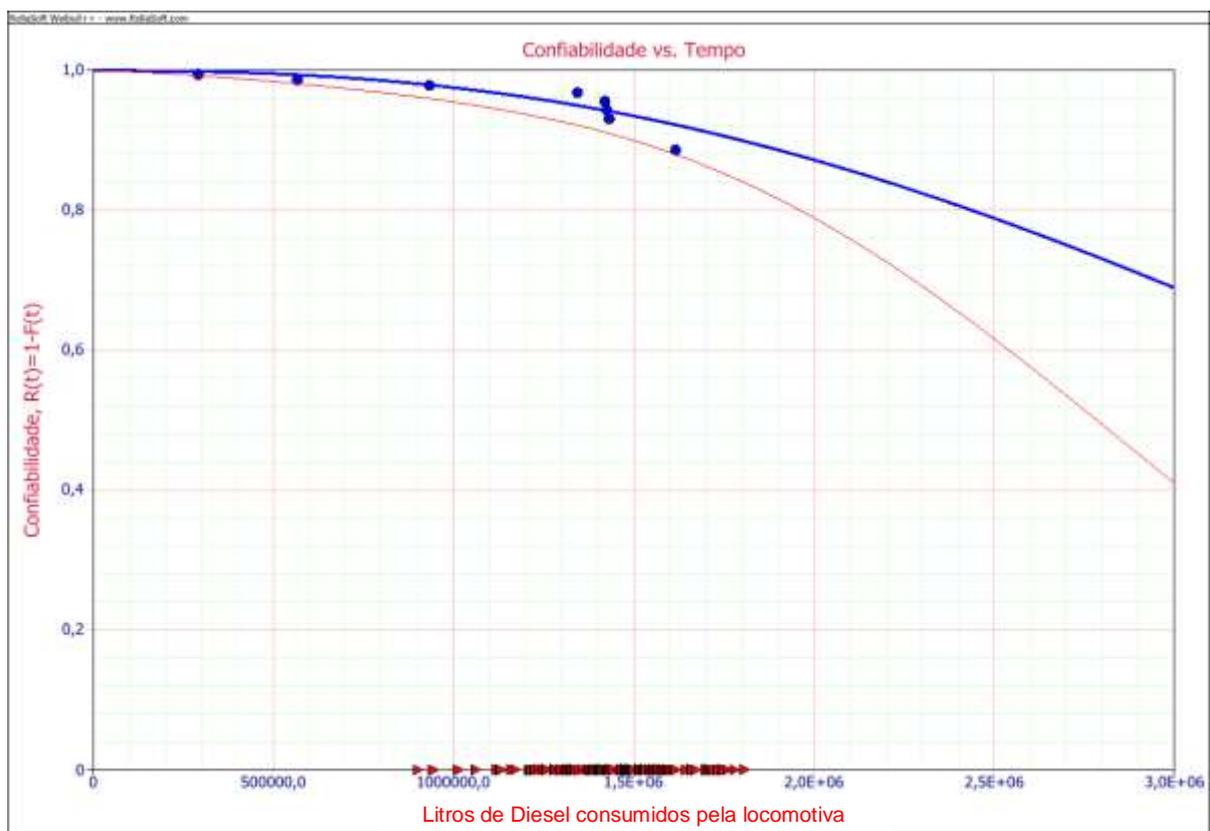
Dois modos de falha apresentaram grande recorrência e foram estudados separadamente. São a fratura da roda quente e a passagem de óleo. Os demais modos de falha apresentaram baixa recorrência quando analisados de forma

isolada, mas produziam consequências semelhantes e quando agrupados formam uma massa de dados mais significativa (23 falhas)

### 3.2.1. Fratura da roda quente

A fratura das palhetas da roda quente é um modo de falha específico de uma população de turbo alimentadores, população que recebeu recentemente um recall devido ao mesmo modo de falha. Essa falha ocorre de forma prematura no componente em relação à sua vida útil esperada, que deveria ser maior que 2.000.000 L de diesel.

Para analisar a vida do componente em relação a este modo de falha específico, todos os outros modos foram tratados como suspensões, assim como os turbos substituídos preventivamente. O resultado para a confiabilidade ao longo do tempo é apresentado no gráfico 1.

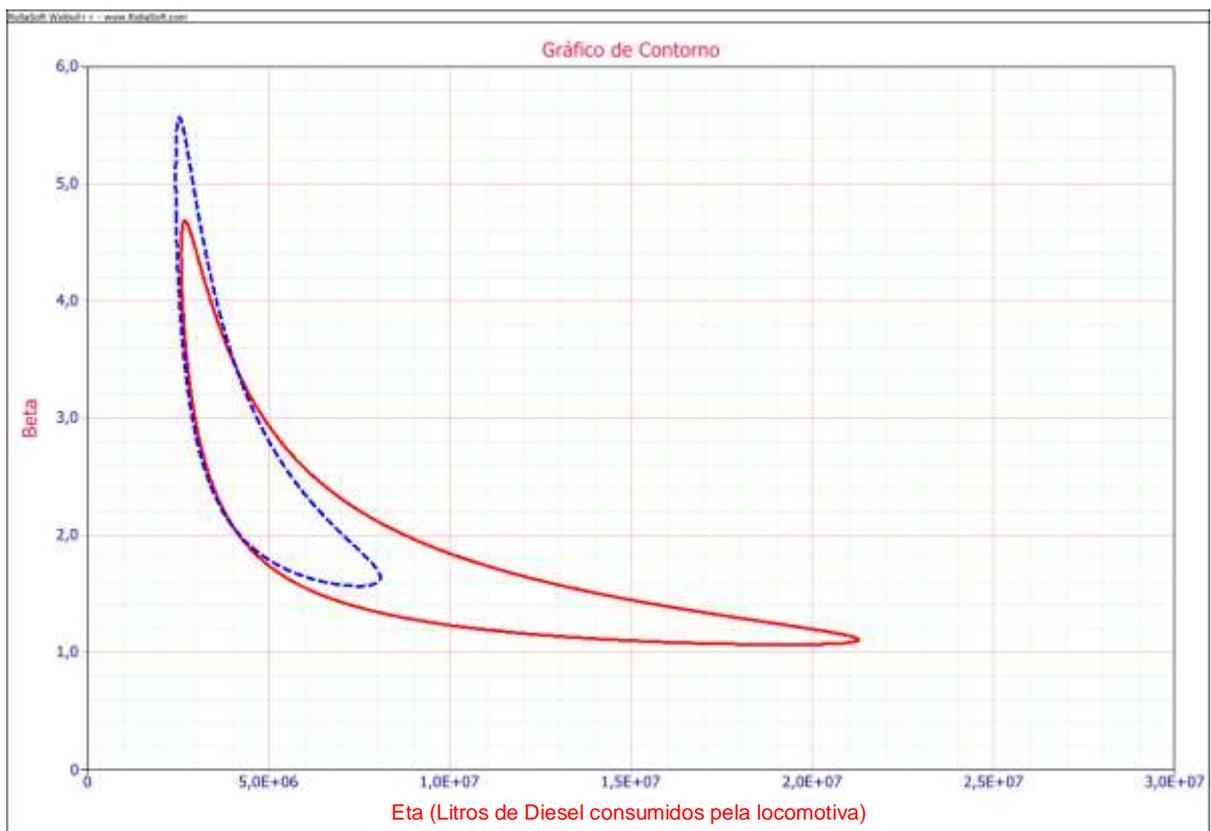


**Gráfico 1** – Confiabilidade x Tempo – Modo de Falha “Fratura da roda quente”  
Fonte: Autoria própria

Todos os gráficos de Confiabilidade x Tempo serão apresentados com o mesmo padrão do gráfico 1: os pontos representam as falhas, a linha azul (superior) a confiabilidade ao longo do tempo de acordo com a função que mais se adequou aos dados pelos testes de aderência e a linha vermelha (inferior) mostra o limite de confiança inferior para 90%. As setas vermelhas no eixo X representam as suspensões na população analisada.

É notada uma concentração de falhas a aproximadamente 1.400.000 L, aproximadamente metade do tempo atual utilizado para substituição preventiva. Como o componente havia passado por recall há pouco tempo, havia grande incerteza sobre a efetividade do mesmo. Dessa forma, foi feito um comparativo entre os dados de vida dos turbos antes e depois do recall em relação a este modo de falha em estudo. O resultado está apresentado no gráfico 2.

A linha azul tracejada mostra a variação dos parâmetros de Weibull  $\beta$  e  $\eta$  dentro da confiança de 90% para a população de turbos antes do recall. A linha vermelha contínua mostra a mesma variação para a nova população de turbos após o recall. É possível perceber uma grande sobreposição entre as duas curvas, o que denota a semelhança no comportamento dos ativos ao longo do tempo.



**Gráfico 2** – Gráfico de contorno comparando populações – Modo de Falha “Fratura da roda quente”  
Fonte: Autoria própria

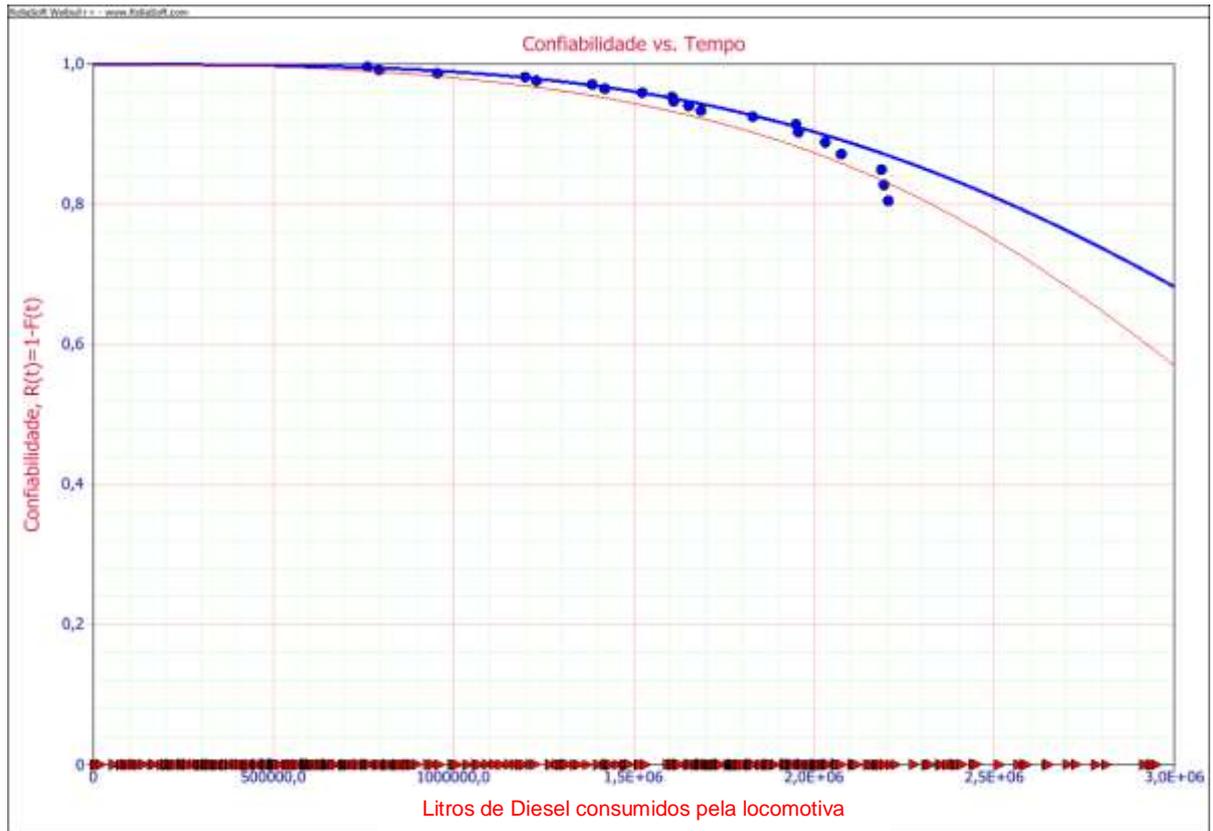
Com esses dados e devido às severas consequências deste modo de falha, foi proposto um novo recall a fim de mitigar os problemas causados pela fratura, realizando modificações na estrutura das palhetas da roda quente.

### 3.2.2. Passagem de óleo

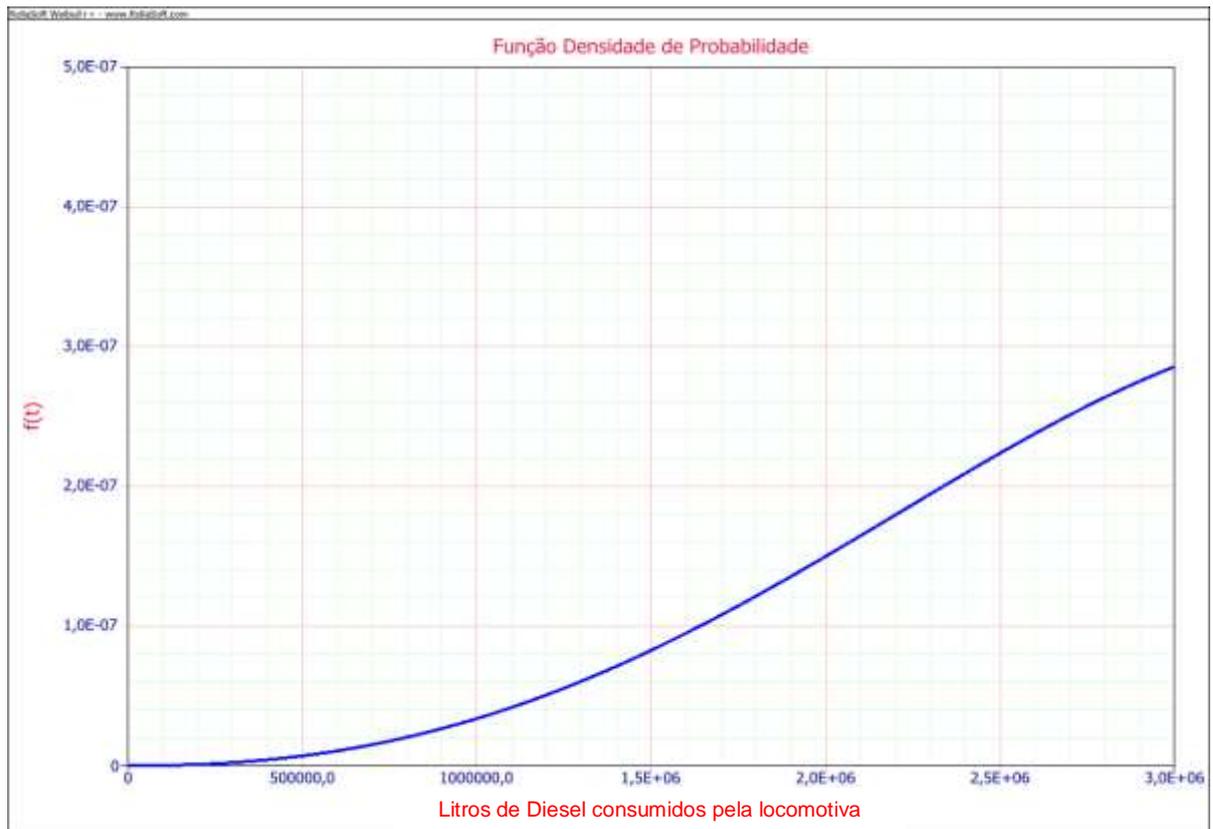
O segundo modo de falha estudado individualmente é referente a um pequeno vazamento de óleo lubrificante identificado durante as inspeções de rotina (a cada 90 dias). Esse vazamento, também chamado de “passagem de óleo” ocorre por falhas no sistema de vedação durante a operação do motor diesel em altas temperaturas e não causa danos no turbo ou outros componentes do motor diesel.

Os dados de vida foram analisados da mesma forma que na seção anterior, considerando os demais modos de falha como suspensões. O resultado para a confiabilidade ao longo do tempo é mostrado no gráfico 3 e sinaliza como a confiabilidade do componente é reduzida com o passar da vida deste. Em seguida também serão apresentadas a função densidade de probabilidade e a taxa de falhas ao longo do tempo para este modo de falha.

No gráfico 3, é possível afirmar com 90% de confiança que a confiabilidade assumirá valores maiores do que o limite sinalizado pela linha vermelha (inferior).



**Gráfico 3** – Confiabilidade x Tempo – Modo de Falha “Passagem de óleo”  
Fonte: Autoria própria



**Gráfico 4** – Função Densidade de Probabilidade – Modo de Falha “Passagem de óleo”  
Fonte: Autoria própria

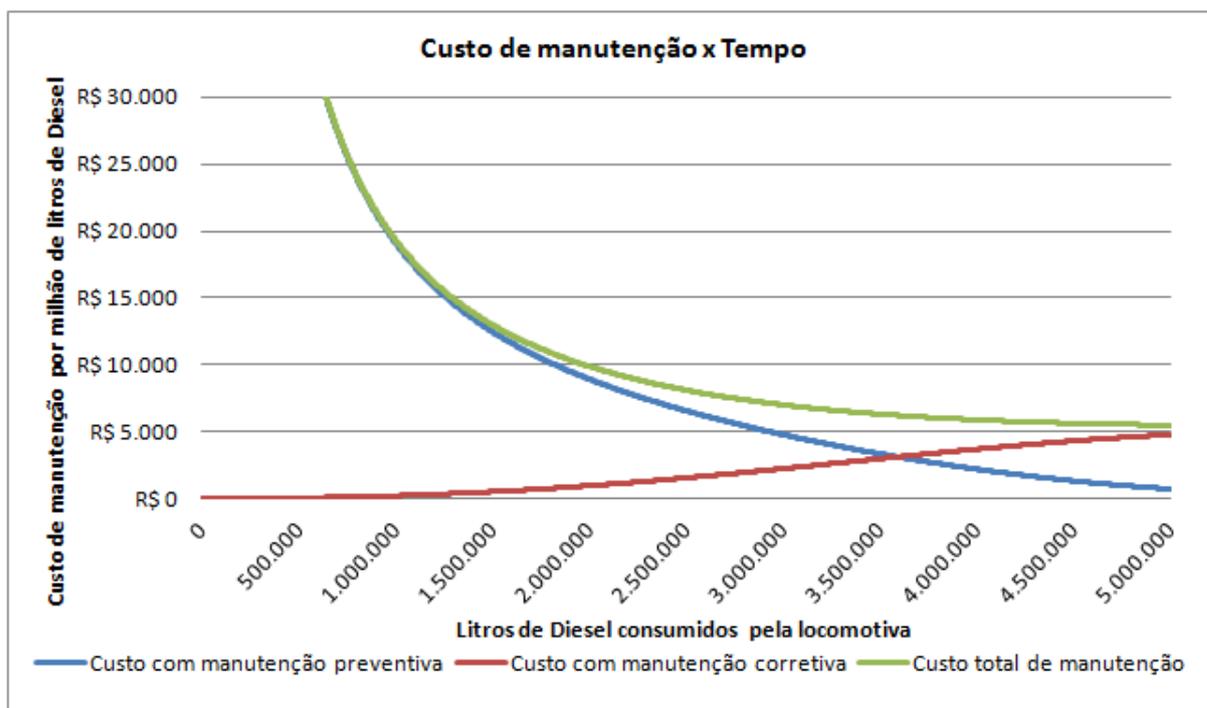
A função densidade de probabilidade apresentada no gráfico 4, assim como a taxa de falhas no gráfico 5, direcionam para o mesmo caminho, que à medida que o tempo passa, maior é a expectativa pontual de falha. Ainda é possível afirmar com 90% de confiança, a partir do gráfico 5, que a taxa de falhas assumirá valores menores do que o limite sinalizado pela linha vermelha (superior).



**Gráfico 5 – Taxa de Falha x Tempo – Modo de Falha “Passagem de óleo”**  
Fonte: Autoria própria

As curvas apresentadas podem levar à interpretação de que é necessária uma alteração no intervalo das substituições preventivas para bloquear este modo de falha, porém duas características importantes apontam para outro caminho. Em primeiro lugar, esse modo de falha é identificado em oficina, durante o ciclo normal de inspeções, não apresentando perda de desempenho para a locomotiva durante sua operação em trem. Em segundo lugar, a identificação da passagem de óleo acarreta a substituição do componente da mesma forma que uma troca preventiva, ou seja, com os mesmos custos de material e mão de obra, uma vez que não há danos em outros componentes.

Como os custos de substituição preventiva e corretiva são iguais, não é viável a troca preventiva do componente. Isso é mostrado no gráfico 6, no qual o custo total de manutenção, que é a soma dos custos de manutenção corretiva e preventiva, fica cada vez menor ao longo do tempo.

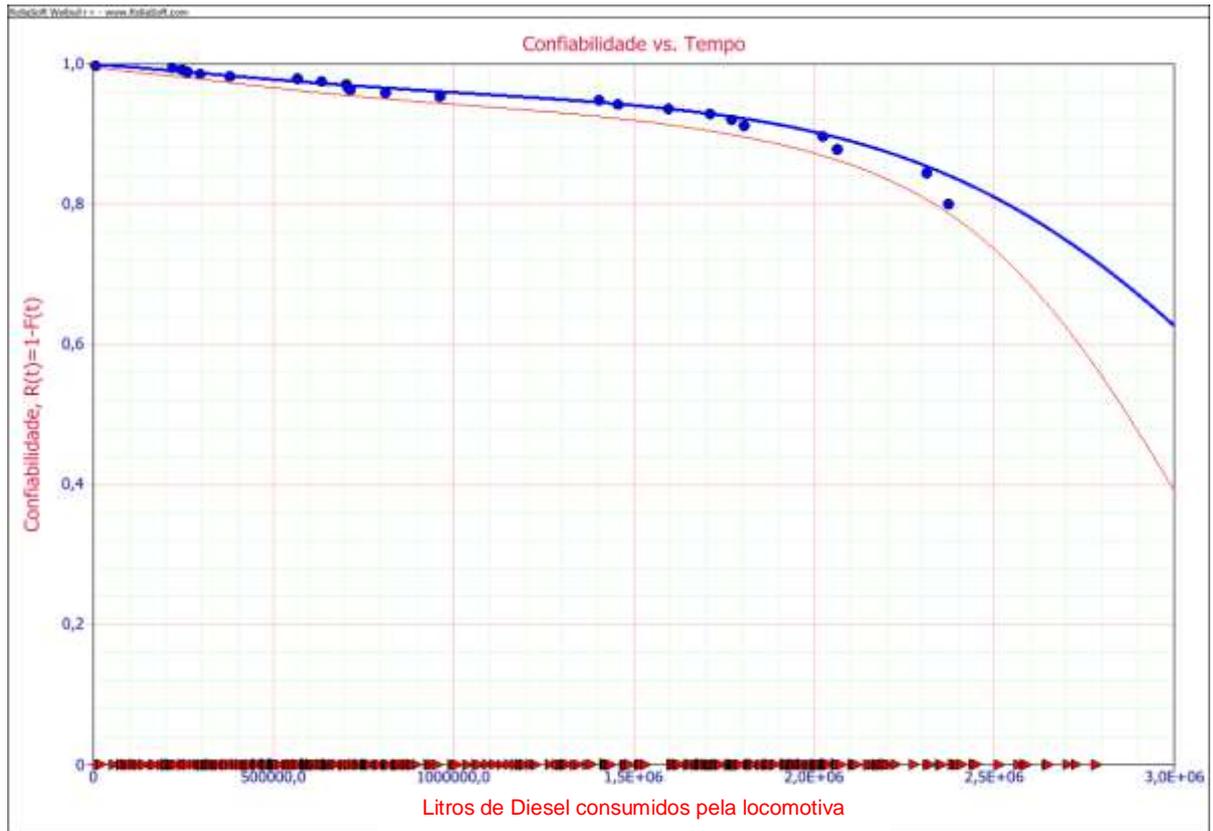


**Gráfico 6** – Custo de manutenção x Tempo – Modo de Falha “Passagem de óleo”  
Fonte: Autoria própria

### 3.2.3. Demais modos de falha

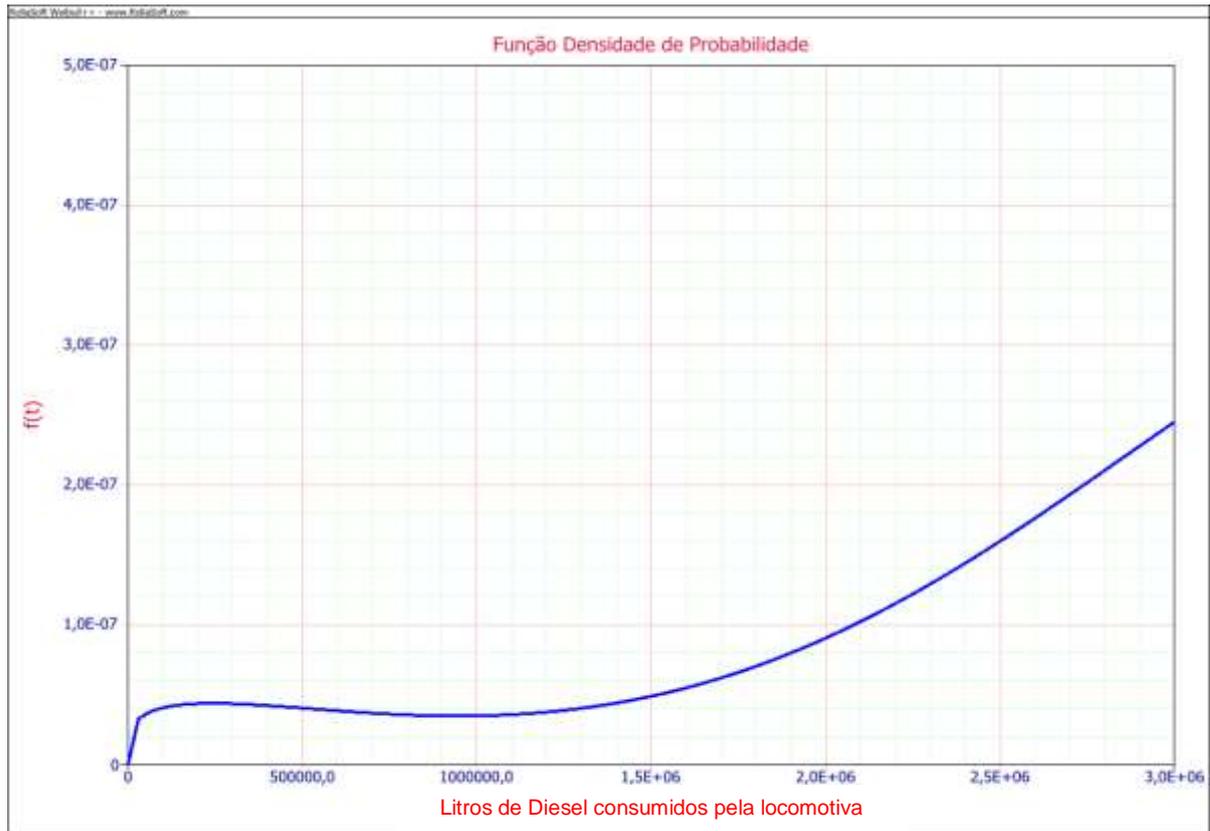
Os demais modos de falha, apesar da baixa recorrência de forma individual, possuem grande expressividade quando agrupados e suas consequências são graves. Exemplos destes modos de falha são: difusor fraturado, eixo travado, roda compressora quebrada, entre outros. Esses modos de falha foram analisados de forma agrupada e foram calculadas algumas informações referentes à confiabilidade.

O gráfico 7 apresentado a seguir representa a confiabilidade ao longo do tempo. É possível notar uma inflexão na curva de confiabilidade próximo a 1.500.000 L, característica que também aparece nos demais gráficos deste modo de falha.



**Gráfico 7 – Confiabilidade x Tempo – Demais modos de falha**  
 Fonte: Autoria própria

Em seguida é mostrada a função densidade de probabilidade no gráfico 8, que sinaliza um aumento da probabilidade de falha com o tempo.



**Gráfico 8** – Função Densidade de Probabilidade – Demais modos de falha  
Fonte: Autoria própria

Uma característica clara da vida deste componente, no que se refere a esses modos de falha, é a taxa de falhas baixa e constante até aproximadamente 1.500.000 L de vida, apresentando a partir desse ponto um crescimento expressivo. Isso também pode ser visualizado no gráfico 9.



**Gráfico 9 – Taxa de Falha x Tempo – Demais modos de falha**  
Fonte: Autoria própria

Como agora estão sendo tratados os modos de falha com consequências catastróficas, não detectáveis em inspeção e com taxa de falhas crescente ao longo do tempo, é possível buscar uma estratégia de substituição preventiva, o que será tratado nas seções seguintes.

Resumindo os dados encontrados nessa seção, cada conjunto de modos de falha assumiu uma distribuição de acordo com o quadro 2 a seguir.

Modo de falha	Distribuição	Parâmetros
Fratura da roda quente	Weibull 2P	Beta = 2.471 / Eta = 4.474.306
Passagem de óleo	Weibull 2P	Beta = 3,285 / Eta = 4.020.074
Demais modos de falha	Weibull mista de 2 subpopulações	Subpopulação 1: Beta = 1,248 / Eta = 987.397 / Porção = 0,061 Subpopulação 2: Beta = 5,461 / Eta = 3.536.763 / Porção = 0,939

**Quadro 2 – Distribuições de vida para os modos de falha estudados**  
Fonte: Autoria própria

### 3.2.3.1. Custos de manutenção

#### 3.2.3.1.1. *Relação de custos entre corretiva e preventiva*

Como citado anteriormente, a manutenção corretiva pode apresentar custos maiores do que a preventiva quando ocorrem danos a outros equipamentos, perdas de produção (lucro cessante), danos ao meio ambiente ou impacto na segurança operacional. No caso dos turbo alimentadores, o impacto das falhas está sobre os outros componentes que fazem interface com ele, como o motor diesel, sensores de temperatura e resfriadores de ar.

Foram levantados os custos de manutenção para as falhas estudadas no agrupamento de “demais modos de falha” – eixo travado, difusor trincado, etc. - no que se refere aos gastos com material e mão de obra, comparando com os custos da substituição preventiva. O custo médio de uma substituição preventiva é de R\$19.320,00, enquanto uma corretiva custa em média R\$33.310,00. A relação entre os tipos de manutenção é de 1,7/1, ou seja, a manutenção corretiva em média custa quase o dobro do que a substituição preventiva.

#### 3.2.3.1.2. *Tempo ótimo de substituição preventiva*

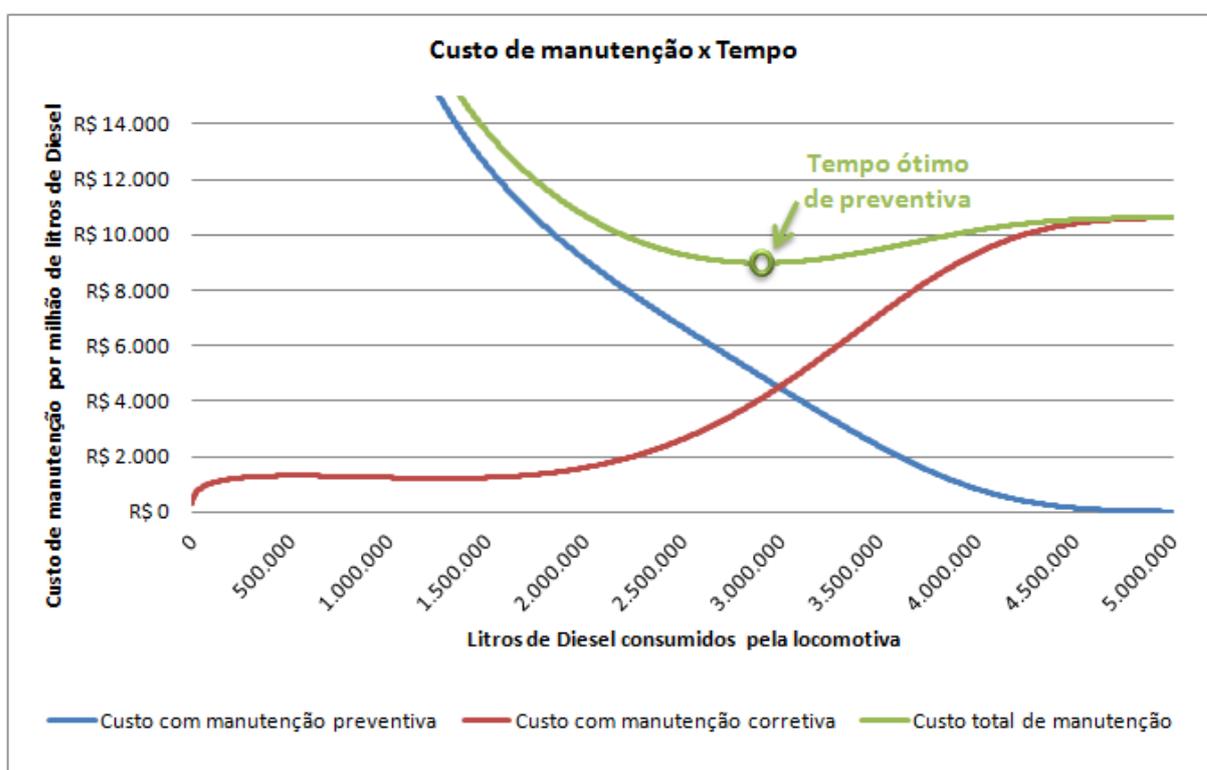
A partir das informações de confiabilidade, probabilidade de falha e custos de manutenção apresentadas nas seções anteriores, é possível calcular o tempo ótimo de manutenção no qual a somatória dos custos de substituição preventiva e corretiva é a menor possível, como apresentado na equação de custo ( $CPUT(x)$ ) no item 2.5.5.

A distribuição  $R(t)$  utilizada na equação  $CPUT(x)$ , cujos gráficos de confiabilidade, taxa de falhas e *pdf* foram apresentados no item 3.2.3, é uma distribuição de Weibull mista, composta por duas subpopulações, com os parâmetros mostrados no quadro 3.

Parâmetros	Subpopulação 1	Subpopulação 2
Beta	1,248	5,461
Eta (Litros de diesel consumidos)	987.397	3.536.763
Porção	0,061	0,939

**Quadro 3** – Parâmetros da distribuição de vida do grupo “demais modos de falha”  
Fonte: Autoria própria

O custo é dado por unidade de tempo, a fim de comparar o custo do ciclo de vida em várias estratégias diferentes. O gráfico 10 mostra o ponto ótimo de preventiva para bloquear os modos de falha agrupados neste trabalho (exceto fratura da roda quente e passagem de óleo).



**Gráfico 10** – Tempo ótimo de preventiva – Demais modos de falha  
Fonte: Autoria própria

O tempo ótimo encontrado foi de 2.900.000 L de diesel. Nesse ponto se encontra o menor custo esperado para a soma dos custos de manutenção preventiva e corretiva.

Mais resultados e outras conclusões sobre estes dados serão tratados no capítulo seguinte.

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresentará os resultados atingidos nas análises citadas no item 3 deste trabalho, com suas aplicações aos processos de manutenção de locomotivas, visando aumentar a confiabilidade e reduzir os custos e riscos operacionais.

### 4.1. ENTENDIMENTO DOS RESULTADOS POR MODO DE FALHA

#### 4.1.1. Fratura da roda quente

Após analisar os dados de vida e comparar estes com os da população de turbos antes do recall, considerando a severidade das consequências deste modo de falha, foi proposto um novo recall a fim de mitigar os problemas causados pela fratura da roda quente, realizando modificações na estrutura das palhetas.

#### 4.1.2. Passagem de óleo

A partir das análises feitas e levando em consideração os custos totais de manutenção, conclui-se que a melhor forma de tratar o modo de falha “passagem de óleo” é com o processo normal de inspeção periódica, realizando a substituição por condição. Essa estratégia minimiza o custo com material e mão de obra, além de evitar a troca desnecessária de componentes.

#### 4.1.3. Demais modos de falha

Analisando os demais modos de falha foi identificada uma oportunidade de revisar o prazo para substituição preventiva, devido ao custo mais alto das manutenções corretivas em relação às preventivas e ao aumento da taxa de falhas em relação ao tempo.

O gatilho atual para a troca preventiva é de 2.530.000 L. Alterá-lo para 2.900.000 L significa substituir menos componentes preventivamente, porém conviver com mais falhas. Ponderando essas duas situações, o custo anual de manutenção de turbo alimentadores, para uma frota de 220 locomotivas, apresenta uma redução de aproximadamente R\$66.000,00 apenas efetuando essa dilatação do gatilho de substituição preventiva.

Dessa forma, o plano de manutenção deve ser modificado, no intuito de dilatar o gatilho de substituição preventiva e reduzir os custos totais de manutenção.

## 5. CONCLUSÕES

O trabalho realizado apresentou os conceitos mais relevantes sobre confiabilidade, análise de dados de vida e mecânica de locomotivas, com foco no componente turbo alimentador.

O objetivo geral de propor estratégias para a manutenção com base no conhecimento do comportamento das falhas foi alcançado, da mesma forma que os objetivos específicos.

Esses objetivos puderam ser atingidos através do estudo do funcionamento de um turbo alimentador e da aplicação de ferramentas de engenharia de confiabilidade, principalmente a análise de dados de vida, em informações coletadas sobre falhas e substituições preventivas. A coleta de dados se mostrou como a etapa mais complexa, devido à necessidade de percorrer longos caminhos no sistema de manutenção para obter informações mais precisas. Isso sinaliza a necessidade de melhorar as informações referentes a falhas e rastreabilidade dos componentes desinstalados das locomotivas.

No capítulo 4 foi apresentada a aplicação do referencial de engenharia de confiabilidade ao turbo alimentador, onde foram identificados os riscos causados pelos principais modos de falha e oportunidades de bloqueio desses riscos.

Foram feitas propostas de estratégias de manutenção capazes de mitigar riscos de falhas catastróficas, além de apresentar a forma ótima de fazê-la, reduzindo o custo total de manutenção do componente e evitando atividades desnecessárias ou onerosas no ativo. O intervalo de substituição ótimo foi definido em 2.900.000 L, o que corresponde a aproximadamente 32 meses, 14% maior que o atual, representando uma redução de aproximadamente R\$66.000,00 no custo anual de manutenção de turbo alimentadores, para uma frota de 220 locomotivas.

### 5.1. TRABALHOS FUTUROS

Os estudos realizados no turbo alimentador permitem iniciar novas análises, tanto em um nível superior – a locomotiva – como em um nível inferior – detalhando os subcomponentes. É possível citar, entre diversas alternativas de análises:

- Desenvolver um diagrama de blocos de confiabilidade para o sistema "locomotiva", a fim de sinalizar o impacto na confiabilidade causado por cada um dos seus componentes – gerador, turbo alimentador, compressor, etc.;
- Desenvolver um diagrama de blocos de confiabilidade para o sistema "turbo alimentador", identificando qual subcomponente possui maior participação na confiabilidade.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**. Confiabilidade e manutenibilidade. Novembro, 1994.

BORBA, J. L. **Módulo material de tração**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2001.

BRINA, H. L. **Estradas de ferro 2**. Tração – Frenagem – Material rodante – Circulação dos trens. 2. ed. Belo Horizonte, 1988.

FOGLIATTO, F. S; DUARTE, J. L. R. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro, 2009.

JUNG, C. F. **Metodologia científica: Ênfase em pesquisa tecnológica**. 3. ed. 2003.

KARDEC, A. NASCIF, J. **Manutenção Função Estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2009.

KOBACCY, K. A. H; MURTHY, D. N. P. **Complex System Maintenance Handbook**. Londres, Inglaterra, 2008.

LIMA, F. A; CASTILHO, J. C N. **Aspectos da manutenção dos equipamentos científicos da Universidade de Brasília**. 2006. 64 f. Dissertação (Especialização) - Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Ciência da Informação e Documentação. Brasília, 2006.

MOUBRAY, J. **Manutenção centrada em confiabilidade**. 2. ed. Lutterworth, Inglaterra, 2000.

RELIASOFT CORPORATION. **Life Data Analysis Reference**. ReliaSoft Publishing, Tucson, AZ, 2015. Disponível em: <[http://reliawiki.org/index.php/Introduction\\_to\\_Life\\_Data\\_Analysis](http://reliawiki.org/index.php/Introduction_to_Life_Data_Analysis)>. Acesso em: 24 ago. 2016.

RELIAWIKI. Maintenance Planning. Tucson, AZ, 2016. Disponível em:  
<[http://reliawiki.org/index.php/Maintenance\\_Planning](http://reliawiki.org/index.php/Maintenance_Planning)>. Acesso em 24 ago. 2016.

TAAM LOCOMOTIVE ARYA. Turbo Charger Component. Teerã, Irã, 2016.  
Disponível em:  
<<http://www.taamlocomotive.com/Turbo%20Charger%20component.aspx>>. Acesso  
em: 22 ago. 2016.