

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE APLICADA À MANUTENÇÃO**

LEONARDO RAFAEL MIO DAL PAI

**ESTUDO DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE UM MOTOR
DIESEL DE LOCOMOTIVA**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

**CURITIBA
2012**

LEONARDO RAFAEL MIO DAL PAI

**ESTUDO DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE UM MOTOR
DIESEL DE LOCOMOTIVA**

Monografia de conclusão do 1º curso de Especialização em Engenharia da Confiabilidade Aplicada à Manutenção do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Engenharia da Confiabilidade Aplicada à Manutenção.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Emerson Rigoni

**CURITIBA
2012**

LEONARDO RAFAEL MIO DAL PAI

**ESTUDO DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE UM MOTOR DIESEL DE
LOCOMOTIVA**

Esta monografia foi julgada e aprovada para a obtenção do grau de **Especialista** no **Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Confiabilidade Aplicada na Manutenção** da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Curitiba, 18 de Julho de 2012.

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
(Orientador - UTFPR)

Prof. Cid Augusto Costa
(Membro da Banca - ReliaSoft)

Prof. Marcelo Rodrigues, M. Sc.
(Membro da Banca - UTFPR)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família que sempre esteve ao meu lado me apoiando e me dando suporte nessa nova etapa.

Também à ajuda e contribuição dada pelo meu chefe Gabriel Martelli e pelos colegas Agnaldo Lopes e Leandro Cavalieri, e pela América Latina Logística ter acreditado no meu potencial me dando a oportunidade para crescer ainda mais profissional e pessoalmente.

Agradeço também aos professores Emerson Rigoni e Cid Augusto Costa que me auxiliaram na construção desta monografia, dos meus conhecimentos em engenharia da confiabilidade e da minha pessoa.

RESUMO

Dal Pai, Leonardo R. M. **Estudo do custo do ciclo de vida de um motor diesel de locomotiva**. 2012. 79 f. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade aplicada à manutenção) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR 2012.

O alto custo de manutenção no transporte ferroviário pode ser dividido em custo da via permanente e custo do material rodante e de tração. Nesse último, representado no Brasil pelas locomotivas diesel-elétricas, o item com maior custo de manutenção é o motor diesel. O impacto da manutenção desse componente e pela idade avançada de algumas locomotivas acarreta em altos custos de operação e de manutenção que diminuem os lucros das operadoras ferroviárias e inviabilizam a expansão do modal. O objetivo desse projeto é realizar uma pesquisa tecnológica exploratória de campo com alternativas de estratégia de manutenção que compare, pela metodologia do LCC, qual é a mais barata e mais viável operacionalmente, e cujo resultado foi o uso combinado de manutenção preventiva e estoque dimensionado dos componentes.

Palavras-chave: Custo do Ciclo de Vida. Motor Diesel. Locomotiva. Ferrovia.

ABSTRACT

Dal Pai, Leonardo R. M. **Study of a Locomotive Diesel Engine's Life Cycle Cost.** 2012. 79 f. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade aplicada à manutenção) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR 2012.

The high cost of the rail transport maintenance can be split into the permanent way cost and the rolling stock. This last one, represented in Brazil for the diesel-electric locomotives, the item more expensive is the diesel engine. The impact of this component maintenance results in high costs of rail operation and maintenance which decrease the profits and spoil the expansion of this type of transportation. The objective of this project is to realize a technological field research with alternatives of maintenance strategy comparing, by the LCC methodology, which one is the less expensive and more operationally viable. The result was a combination of preventive maintenance and a dimensioned stock of the components.

Keywords: Life Cycle Cost, Diesel Engine, Locomotive, Railway

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de uma locomotiva diesel-elétrica.	12
Figura 2 – Custos durante o ciclo de vida de um equipamento	13
Figura 3 - Trem composto por uma locomotiva (material de tração) e três vagões (materiais sem tração)	18
Figura 4 - DC-DC - Gerador em Corrente Contínua e Motor em Corrente Contínua.	21
Figura 5 - AC-DC - Gerador em Corrente Alternada e Motor em Corrente Alternada.	21
Figura 6 - AC-DC-AC - Gerador em Corrente Alternada e Motor em Corrente Alternada.	21
Figura 7 - Sistema de alimentação de uma locomotiva elétrica com motores de tração em corrente contínua e corrente alternada.	22
Figura 8 - Exemplo de projeto para vagões para sal, açúcar e fertilizantes.	23
Figura 9 - Motor diesel de 4 tempos de uma GE C-30	27
Figura 10 - Bloco do motor diesel.....	28
Figura 11 - Gráfico da taxa de falha do bloco do motor diesel.....	29
Figura 12 - Conjunto de força de um motor diesel 4 tempos	31
Figura 13 - Estrutura em corte do conjunto de força de um motor diesel de 4 tempos.	31
Figura 14 - Gráfico da Taxa de Falha do Conjunto de Força da GE C30	32
Figura 15 - Conjunto biela mestre e biela articulada de um motor diesel 4 tempos ..	33
Figura 16 - Turbo de uma locomotiva modelo GE C30.....	34
Figura 17 - Gráfico da Taxa de Falha do Turbo da GE C30	35
Figura 18 - Diagrama simplificado do governador. Conforme os dois volantes horizontais abrem, o colar sobe e realiza o controle da rotação do motor.	38
Figura 19 - Custos de Aquisição do Equipamento.....	40
Figura 20 - Custos de Sustentação do Equipamento.	40
Figura 21 - Diagrama passo a passo do LCC.	42
Figura 22 - Categorias de custo para a alternativa 1.....	47
Figura 23 - Categorias de custo para a alternativa 2.....	48
Figura 24 - Categorias de custo para a alternativa 3.....	48
Figura 25 - Categorias de custo para a alternativa 4.....	49
Figura 26 - Categorias de custo para a alternativa 5.....	49
Figura 27 - (a) Gráfico de probabilidade de falha do conjunto de força, para 6 anos. (b) Gráfico de probabilidade falha de turbo, para 6 anos.....	53
Figura 28 - Fluxo de caixa por ano das manutenções preventivas da alternativa 3..	58
Figura 29 - Fluxo de caixa por ano das manutenções preventivas da alternativa 4..	62
Figura 30 - Fluxo de caixa por ano das manutenções preventivas da alternativa 5..	64
Figura 31 - Soma dos VPLs acumulados do custo total do motor diesel.	69
Figura 32 - Gráfico de Pareto dos custos médios da alternativa 1.....	70
Figura 33 - Gráfico de Pareto dos custos médios da alternativa 2.....	70
Figura 34 - Gráfico de Pareto dos custos médios da alternativa 3.....	71
Figura 35 - Gráfico de Pareto dos custos médios da alternativa 4.....	71
Figura 36 - Gráfico de Pareto dos custos médios da alternativa 5.....	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tempos de troca preventiva dos componentes para a alternativa 3.	57
Quadro 2 – Novas funções de confiabilidade para os componentes para a alternativa 4.....	60
Quadro 3 – Tempos de troca preventiva dos componentes do motor para a alternativa 4.....	61
Quadro 4 – Probabilidade de falha do turbo com vida útil de 6 anos.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempos médios de falha e de reparo da alternativa 1.	44
Tabela 2 – Tempos de Reparo estimados para a alternativa 2.	45
Tabela 3 – Tempos de Reparo estimados para a alternativa 4.	46
Tabela 4 – Custos dos componentes do motor diesel para a alternativa 1.....	54
Tabela 5 – Probabilidades condicionais dos componentes com taxa de falha variável da alternativa 1.....	54
Tabela 6 – Custos de oportunidade do conjunto de força (CF) e do turbo da alternativa 1.....	54
Tabela 7 – Custos dos componentes do motor diesel da alternativa 2.....	56
Tabela 8 – Custos de oportunidade do conjunto de força (CF) e do turbo da alternativa 2.....	56
Tabela 9 – Custos dos componentes do motor diesel da alternativa 3.....	59
Tabela 10 – Custos de oportunidade do conjunto de força (CF) e do turbo da alternativa 3.....	59
Tabela 11 – Probabilidades condicionais dos conjuntos de força e turbo para a alternativa 3.....	60
Tabela 12 – Probabilidades condicionais dos conjuntos de força e turbo para a alternativa 4.....	61
Tabela 13 – Custos dos componentes do motor diesel da alternativa 4.....	63
Tabela 14 – Custos de oportunidade do conjunto de força (CF) e do turbo da alternativa 4.....	63
Tabela 15 – Custos dos componentes do motor diesel da alternativa 5.....	65
Tabela 16 – Custos de oportunidade do conjunto de força (CF) e do turbo da alternativa 5.....	65
Tabela 17 – Resumo dos valores de cada alternativa.....	67
Tabela 18 – Soma do valor presente líquido de todas as alternativas dos custos do motor diesel em 12 anos.....	68
Tabela 19 – Comparação financeira dos componentes pelo tempo médio entre reparos (MTTR).....	74
Tabela 20 – Comparação financeira entre os componentes pelos seus tempos médio entre falhas (MTTF) e custo singular de cada peça.....	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 TEMA	11
1.1.1 Delimitação do Tema	12
1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	13
1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS	14
1.4 OBJETIVOS	14
1.4.1 Objetivo Geral	15
1.4.2 Objetivos Específicos	15
1.5 JUSTIFICATIVA.....	15
1.6 METODOLOGIA DE PESQUISA	16
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 FUNDAMENTOS DE OPERAÇÃO FERROVIÁRIA	18
2.1 MATERIAL RODANTE	20
2.1.1 Material de Tração	20
2.1.1.1 Locomotiva Diesel-Elétrica.....	20
2.1.1.2 Locomotiva Elétrica.....	22
2.1.2 Material sem tração.....	23
2.2 A CONFIABILIDADE DA OPERAÇÃO FERROVIÁRIA.....	24
2.3 ESTRUTURA DAS LOCOMOTIVAS DIESEL-ELÉTRICAS	24
2.4 MOTOR DIESEL.....	25
2.4.1 Características	26
2.4.2 Peças principais do Motor Diesel	28
2.4.2.1 Bloco.....	28
2.4.2.2 Eixo de Comando	29
2.4.2.3 Conjunto de Força	30
2.4.2.4 Biela.....	32
2.4.2.5 Turbo	33
2.4.2.6 Engrenagens	35
2.4.2.7 Bomba de Óleo.....	36
2.4.2.8 Bomba d'Água	36
2.4.2.9 Bomba Injetora	37
2.4.2.10 Governador.....	37
3 O CICLO DE VIDA DE UM COMPONENTE E SEU CUSTO	39
3.1 BENEFÍCIOS DO LCC.....	39
3.2 ESTIMANDO O CUSTO DO CICLO DE VIDA DE UM COMPONENTE	40
3.3 ETAPAS DO ESTUDO DO LCC	41
4 O LCC APLICADO AO MOTOR DIESEL FERROVIÁRIO	43
4.1 ETAPA 1: DEFINA O PROBLEMA	43
4.2 ETAPA 2: DEFINA AS ESTRATÉGIAS ALTERNATIVAS	44
4.3 ETAPA 3: PREPARE A ESTRUTURA DE CUSTOS	47

4.4 ETAPA 4: ESCOLHA O MODELO ANALÍTICO DE CUSTO	50
4.5 ETAPA 5: REÚNA AS ESTIMATIVAS E O MODELOS DE CUSTO	50
4.6 ETAPA 6: FAÇA OS CUSTOS ESTIMADOS PARA CADA ANO	66
4.7 ETAPA 7: ENCONTRE O PONTO DE EQUILÍBRIO DAS ALTERNATIVAS	68
4.8 ETAPA 8: CONSTRUA O GRÁFICO DE PARETO PARA DESCOBRIR QUEM CONTRIBUI MAIS NO CUSTO.....	69
4.9 ETAPA 9: ANÁLISE DOS ALTOS CUSTOS E SUAS RAZÕES.....	72
4.10 ETAPA 10: ESTUDE OS RISCOS DOS ITENS MAIS CAROS E SUAS OCORRÊNCIAS	74
4.11 ETAPA 11: SELECIONE A MELHOR ALTERNATIVA COM BASE NO LCC .	76
5 CONCLUSÃO	77
REFERÊNCIAS	79
APÊNDICES	79

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo será contemplado com o tema desenvolvido neste projeto, com suas delimitações, o problema, as premissas e os objetivos.

1.1 TEMA

No transporte ferroviário, chama-se trem o conjunto da locomotiva, a força motriz, e o vagão, onde fica a carga transportada. Basicamente, hoje em dia, usam-se apenas dois tipos de tecnologia de força motriz em locomotivas: as elétricas e as diesel-elétricas. As locomotivas elétricas são mais leves e amplamente usadas no transporte de passageiros. Nela, o sistema de tração é alimentado diretamente por redes elétricas instaladas ao longo da via e enviadas aos motores elétricos de tração que fazem girar as rodas e movimentar a locomotiva. (BORBA, 2007)

As locomotivas diesel-elétricas são utilizadas, em sua maioria, no transporte de cargas e dispensam os cabos elétricos ao longo da ferrovia. Nesse modelo de locomotiva, um motor mecânico alimentado com óleo transmite energia mecânica a um gerador ou alternador que a transforma em energia elétrica e transmite aos motores elétricos de tração. (CAVAZZONI, 2008)

Ao dispensar a eletrificação da via, a instalação desse tipo de ferrovia é mais barata, mas a necessidade de uma interface eletromecânica entre motor diesel – Alternador – Motor de Tração e o próprio desgaste das peças mecânicas do motor diesel torna sua manutenção mais cara do que uma locomotiva elétrica. (BORBA, 2007)

Assim sendo, as locomotivas diesel-elétricas usadas no transporte ferroviário brasileiro, novas e modernas ou antigas, necessitam de um cuidado quanto à estratégia de manutenção aplicada de forma a estar alinhada com o conceito da produção moderna que exige uma alta disponibilidade do ativo para atingir o máximo da produção. (BLISCHKE, et al., 2000)

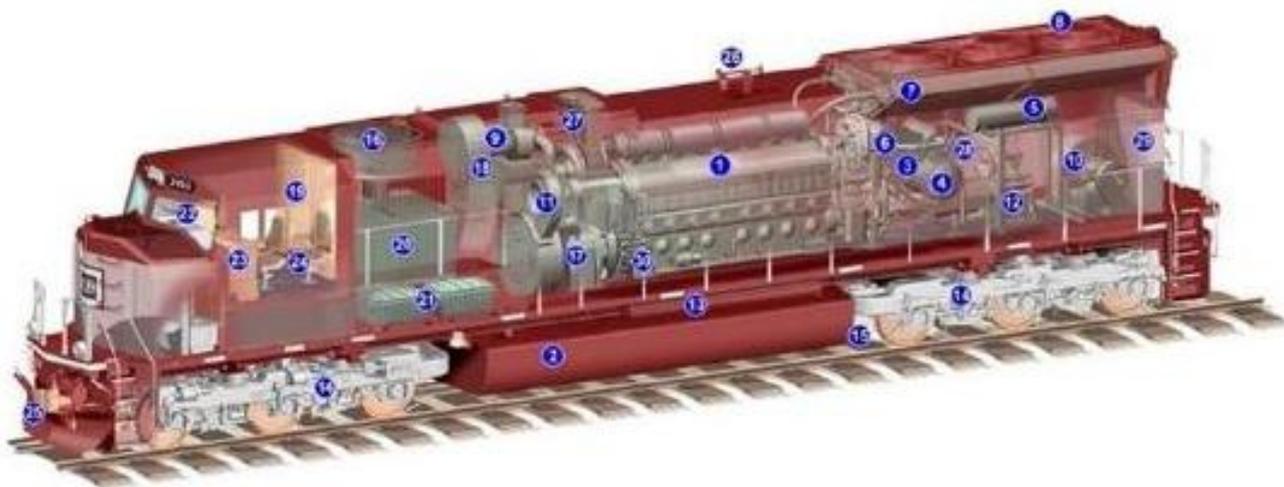


Figura 1 - Esquema de uma locomotiva diesel-elétrica.
Fonte: (BORBA, 2009)

Na figura 1, pode-se identificar:

- | | |
|---|--------------------------------------|
| 1 – Motor Diesel | 16 – Freio Dinâmico |
| 2 – Tanque de Combustível | 17 – Gerador de tração |
| 3 – Resfriador de óleo lubrificante | 18 – Filtro de inércia |
| 4 – Filtro de óleo lubrificante | 19 – Armário Elétrico 1 |
| 5 – Reservatório auxiliar de água | 20 – Armário Elétrico 2 |
| 6 – Reservatório principal de água | 21 – Baterias |
| 7 – Radiadores | 22 – Console do maquinista |
| 8 – Ventiladores do sistema de resfriamento | 23 – Console do auxiliar |
| 9 – Soprador do truque 1 | 24 – Poltronas |
| 10 – Soprador do truque 2 | 25 – Engates |
| 11 – Soprador gerador | 26 – Buzina |
| 12 – Compressor de ar | 27 – Escapamento do Motor Diesel |
| 13 – Reservatório de ar | 28 – Filtro primário do Motor Diesel |
| 14 – Truque | 29 – Reservatório de areia |
| 15 – Motor de Tração | 30 – Motores de partida |

A locomotiva por ser uma máquina de grande porte, toda vez que sofre uma avaria depende de uma grande estrutura para realizar a manutenção e são peças caras com necessidade de muitos homens-hora. O componente principal dessa máquina é o motor diesel, que também é o mais caro e o que interfere mais na boa operação da locomotiva.

1.1.1 Delimitação do Tema

O custo financeiro da manutenção de locomotivas, principalmente nos grandes componentes responsáveis pelo fornecimento de energia ou responsáveis pela tração, pode diminuir a viabilidade das ferrovias para alguns trajetos ao elevar os custos de operação, do qual faz parte o custo de manutenção.

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Várias metodologias podem ser aplicadas para buscar essa alternativa ideal como os cálculos de degradação de componentes, cálculos de vida, análises de falha e manutenção centrada em confiabilidade. Outra alternativa, mais focada no lado financeiro da análise é o *Life Cycle Cost* (LCC – do inglês, traduzido livremente para Custo do Ciclo de Vida), ilustrado na Figura 2.

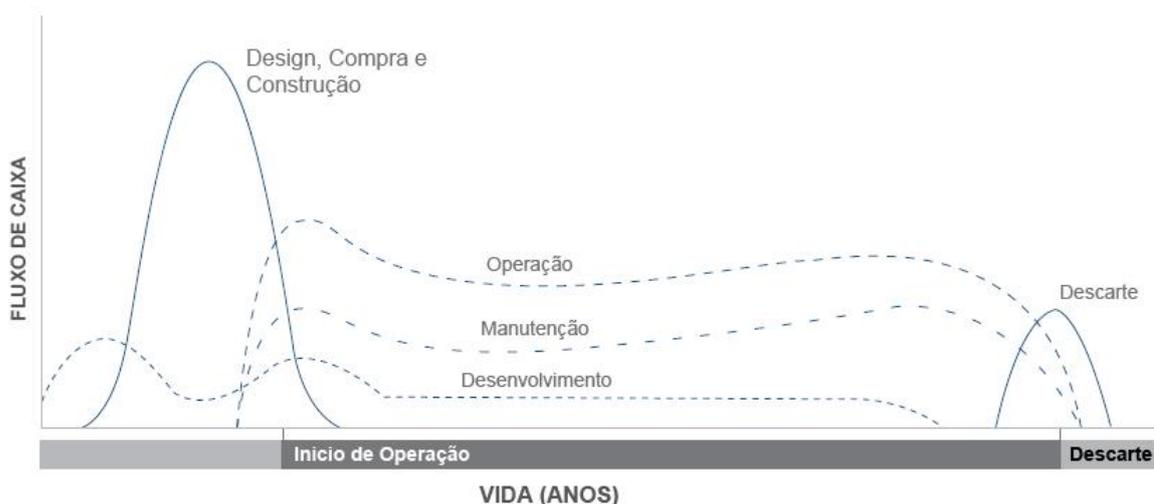


Figura 2 – Custos durante o ciclo de vida de um equipamento
Fonte: (AUSTRALIAN NATIONAL AUDIT OFFICE, 2011)

Assim, essa metodologia de estudo abrange os custos desde a pesquisa e desenvolvimento do equipamento até o seu descarte, e prevê aquela estratégia de desenvolvimento, operação, manutenção e descarte que custe menos ao longo de toda essa vida. Para esse projeto, ela visará principalmente guiar a estratégia de manutenção preventiva do motor diesel e de suas peças internas de modo a contribuir para a diminuição com os gastos operacionais da companhia.

A metodologia utilizada tem como base o diagrama retirado de Barringer, et al. (1996) onde os autores expõem de forma bem clara a metodologia usada. A partir do problema exposto que é o alto custo de manutenção e alto índice de falhas em motores diesel escolher-se-á a melhor estratégia de manutenção baseado no estudo.

1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS

O problema principal como ora citado são os altos custos de manutenção, mas outro problema que traz custos altos para a operação é o alto índice de falhas, devido ao uso de equipamentos antigos e de baixa manutenção. Cada locomotiva tem uma média de 1,9 falhas por ano o que gera uma indisponibilidade de 96.419 horas no total para a operação de locomotivas e acarreta um custo indireto pela falta de locomotivas para formação de trem. A locomotiva que servirá de modelo a esse trabalho, a GE C30 tem em média 30 anos, e desde que ela foi adquirida pela companhia na última década não passou por nenhuma política de manutenção que não fosse a corretiva. E a justificativa sempre foi que manutenção preventiva teria um custo direto no orçamento que a companhia não suportaria. Faz-se necessário, portanto, determinar quantitativamente qual estratégia de manutenção é a mais viável economicamente desde a sua compra até o descarte e em que momento vai ser descartado.

Para isso, serão usados os dados de falha de locomotivas que são analisados todos os dias que constituirão as funções de falha dos componentes que formam o motor diesel e juntamente com a diferença de preços e de tempo de vida, poderão nos dar um panorama entre as possíveis alternativas de qual é a de menor custo, realmente.

1.4 OBJETIVOS

Neste tópico será apresentado, o objetivo geral e específico da monografia.

1.4.1 Objetivo Geral

O LCC é um estudo técnico-financeiro que leva em conta todos os custos de um equipamento, desde seus custos de pesquisa e desenvolvimento até os custos de descarte do equipamento após o seu uso. Neste contexto o objetivo geral é:

Realizar o estudo do ciclo de vida de um motor diesel de locomotiva buscando definir a estratégia de manutenção que minimize os custos totais de operação e manutenção.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Definir as alternativas de estratégia de manutenção do motor diesel;
- Validar os custos de vida de cada alternativa com a gerência e buscar os motivos dos itens com alto custo.
- Realizar a comparação financeira entre cada alternativa;
- Definir a melhor estratégia de manutenção com base nas informações do estudo em consenso com especialistas e a gerência.

1.5 JUSTIFICATIVA

No atual período que se busca a reativação do modal ferroviário no Brasil é oportuno realizar um estudo que determine a melhor estratégia de manutenção verificando não só o custo da manutenção como os custos operacionais envolvidos do principal componente de uma locomotiva diesel-elétrica que é também a maior causa de indisponibilidade para a produção.

Portanto, achar a melhor estratégia de manutenção que maximize a disponibilidade, a confiabilidade e diminua os custos operacionais envolvidos fará com que as ferrovias possam se expandir ainda mais nesse que é atualmente a era do renascimento ferroviário, modal deixado de lado após a II Guerra Mundial no Brasil. (BORBA, 2007)

1.6 METODOLOGIA DE PESQUISA

Levando em conta os critérios de classificação de pesquisa descritos em (GIL, 2002) podemos classificar a pesquisa quanto à área de conhecimento como tecnológica. Quanto à sua finalidade a pesquisa é aplicada, já quanto aos objetivos gerais e propostos, é exploratória. Por fim, quanto ao método empregado é um estudo de campo com coleta de dados primário buscado com análise de dados de sistema de falhas de locomotivas, tratamento posterior em programa de computador específico e aplicação às etapas do custo do ciclo de vida de (BARRINGER, et al., 1996).

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 mostra a introdução do projeto, com o tema e objetivos do estudo, mostrando o problema, justificativa, uma breve apresentação da metodologia e o cronograma de execução.

No capítulo 2 será abordada uma explicação técnica sobre o transporte ferroviário e o impacto dos custos de manutenção de locomotivas no custo total da operação.

O capítulo 3 explica a metodologia utilizada, com conceitos de confiabilidade, o passo a passo da metodologia do LCC e como os dados são adquiridos.

O capítulo 4 aplica a metodologia no assunto abordado, o motor diesel de uma locomotiva diesel-elétrica, com as justificativas e aplicações para a operação ferroviária.

O capítulo 5 é a conclusão do projeto, justificando a escolha da estratégia alternativa escolhida e o que será feito com o estudo.

Ao final do estudo apresentam-se as referências utilizadas no trabalho e que podem ser consultadas caso qualquer dúvida surja.

2 FUNDAMENTOS DE OPERAÇÃO FERROVIÁRIA

Uma operação de transporte significa levar uma carga de um ponto ao outro, utilizando uma via através de um meio de condução. No exemplo mais conhecido, o transporte por caminhões carrega uma carga de um terminal de cargas até outro utilizando uma rodovia. No caso do modal ferroviário, um trem carrega uma determinada carga de um terminal ao outro, mas desta vez utilizando uma estrada de ferro. (BORBA, 2007)

Um trem é o conjunto de locomotivas e vagões, sendo as locomotivas o material de tração e os vagões o material rodante. O material de tração fornece a energia para mover o material rodante, onde fica disposta a carga. Assim sendo, como um exemplo, um trem comum de transporte de grãos é composto por duas ou três locomotivas e 80 a 100 vagões, vindo do terminal de Maringá (PR) até o porto de Paranaguá (PR).



Figura 3 - Trem composto por uma locomotiva (material de tração) e três vagões (materiais sem tração)

Fonte: Autoria própria

Um trem pode ser classificado de diversos modos como explica (BORBA, 2007):

- 1) Por tipo da carga
 - a. Cargueiros: Carregam vagões de carga entre dois pátios ou entre um pólo gerador de carga (uma mina de minério de ferro, por exemplo) e um pólo absorvedor de carga (uma siderúrgica ou um porto de exportação, por exemplo);
 - b. Passageiros: Carregam exclusivamente pessoas entre regiões numa mesma cidade, entre cidades ou entre regiões distantes;
 - c. Mistos: Comuns no passado, eram compostos de vagões de carga
 - d. Serviço: Trens com carga da própria ferrovia (como peças) ou de manutenção de via.

- 2) Pela prioridade: Definem a prioridade que cada trem tem um sobre o outro em cruzamentos.
 - a. Alta Prioridade
 - b. Média Prioridade
 - c. Baixa Prioridade
- 3) Característica de carregamento.
 - a. Direto: Já sai completo do primeiro pátio de carregamento com destino ao pátio de descarregamento, sem paradas intermediárias.
 - b. Parador: Trem que vai parando em diversos pátios ao longo do trajeto para carregar ou descarregar vagões.
 - c. Local: Trem que faz a conexão entre o pátio principal e os pontos de carga e descarga dos clientes.

Assim um trem pode ser medido pela capacidade de carga que ele transporta e seu desempenho num período mais longo é variado segundo a velocidade do trem, desenho do trem e a capacidade da via permanente.

A velocidade do trem pode ser definida como a velocidade de percurso e a velocidade comercial. Na velocidade de percurso é a velocidade que o trem efetivamente realiza ao trafegar entre os diversos pátios de cruzamento, desconsiderando, portanto um possível tempo de espera em tais pátios. A velocidade comercial é obtida da divisão da distância entre o pátio de origem e o pátio de destino do trem pelo tempo total de trânsito entre esses dois pátios.

O desenho do trem é o que se considera como quantas locomotivas e quantos vagões formarão o trem e qual serão a posição de cada locomotiva e vagão nesse trem. Esse desenho é feito levando em conta o esforço-tração de cada locomotiva e o peso útil dos vagões, além de verificar se o comprimento total do trem é menor do que o menor pátio de cruzamento na via que ele utilizará. O número de pátios de cruzamento, do grau das rampas e o comprimento dos túneis existentes configuram a capacidade da via permanente, e que também é usado ao realizar o cálculo do trem.

Um trem sobrecarregado, ou seja, com carga acima do nominal, afeta a operação da locomotiva, influenciando diretamente sua confiabilidade e aumentando os custos de manutenção, ao levar a locomotiva a um esforço maior do que ela foi projetada a realizar. Lembrando o postulado de que a “confiabilidade de um

equipamento é a probabilidade de sucesso de uma missão, num determinado tempo e sob determinadas condições de operação”, (BLISCHKE, et al., 2000 p. 18) ao alterar as condições de operação para condições mais severas claramente a confiabilidade do equipamento cai.

Respeitar a correta operação da locomotiva, levando em conta seus valores nominais de potência, esforço-tração e capacidade de carga levará com que os custos de manutenção não aumentem por falha prematura de componentes.

2.1 MATERIAL RODANTE

Os veículos ferroviários usados na composição do transporte ferroviário são denominados materiais rodantes e são compostos por aqueles compostos de motores que realizam a tração e os que não dispõem de motores e são puxados pelos primeiros. (BORBA, 2007)

2.1.1 Material de Tração

Há quatro tipos principais de materiais de tração: locomotivas diesel-elétricas, locomotivas elétricas, locomotivas a vapor e automotrizes, que serão brevemente descritas a seguir.

2.1.1.1 Locomotiva Diesel-Elétrica

As locomotivas diesel-elétricas são as mais utilizadas no transporte de carga no Brasil, (ANTT, 2010) sendo um modelo que aplica uma transmissão de energia mecânica em energia elétrica e então em esforço para tração. Ela usa um motor diesel acoplado a um gerador ou alternador, que transforma a energia da rotação do virabrequim do motor diesel para gerar a corrente elétrica que alimenta os motores

elétricos de tração que farão as rodas tracionar e a locomotiva andar. (BORBA, 2007)

Essa combinação permite que as locomotivas diesel-elétricas desenvolvam sua potência máxima em baixas velocidades, sendo os motores de tração elétricos, eles tem seu torque máximo em baixas rotações.

Há três tipos de locomotivas diesel-elétricas, conforme o tipo do gerador de energia e o motor de tração utilizado, conforme as Figura 4, Figura 5 e Figura 6.

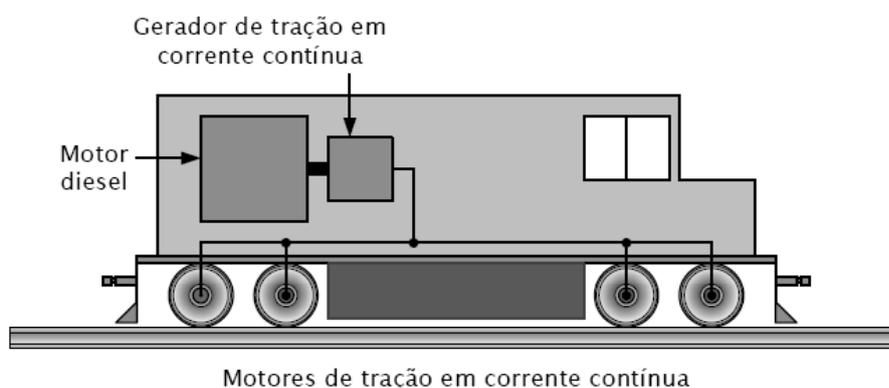


Figura 4 - DC-DC - Gerador em Corrente Contínua e Motor em Corrente Contínua.
Fonte: (BORBA, 2007)

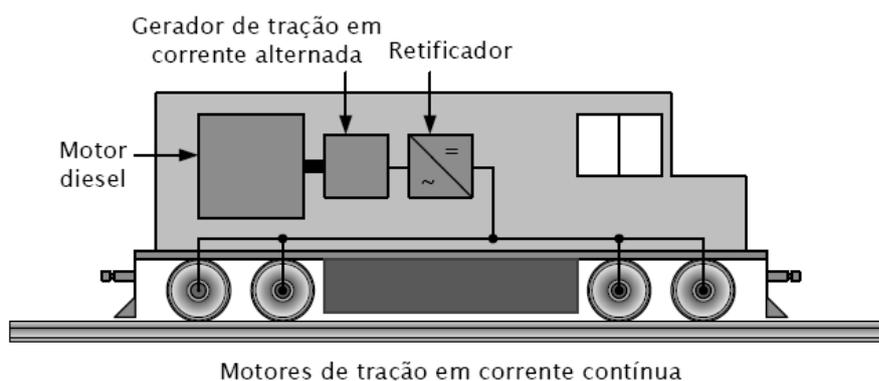


Figura 5 - AC-DC - Gerador em Corrente Alternada e Motor em Corrente Alternada.
Fonte: (BORBA, 2007)

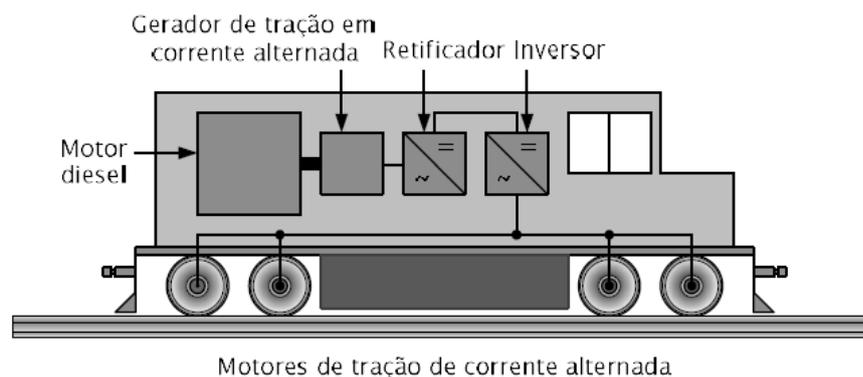


Figura 6 - AC-DC-AC - Gerador em Corrente Alternada e Motor em Corrente Alternada.
Fonte: (BORBA, 2007)

Essa sequência também mostra a evolução tecnológica das locomotivas, que cada vez mais exigiram maior capacidade de tração e controle que implica numa maior aderência e potência.

2.1.1.2 Locomotiva Elétrica

A alimentação dos motores elétricos de tração são feitos externamente, por pantógrafos em contato com uma rede aérea de alimentação ou sapatas de 3º trilho energizado, como mostrado na Figura 7. Em regiões menos povoadas, é utilizado redes de corrente alternada de 25kV ou 50kV, onde dentro da locomotiva há um rebaixamento de tensão e retificadores pois os motores de tração são em corrente contínua. No entanto, o sistema mais utilizado é a alimentação direta em corrente contínua de 600V a 3kV.

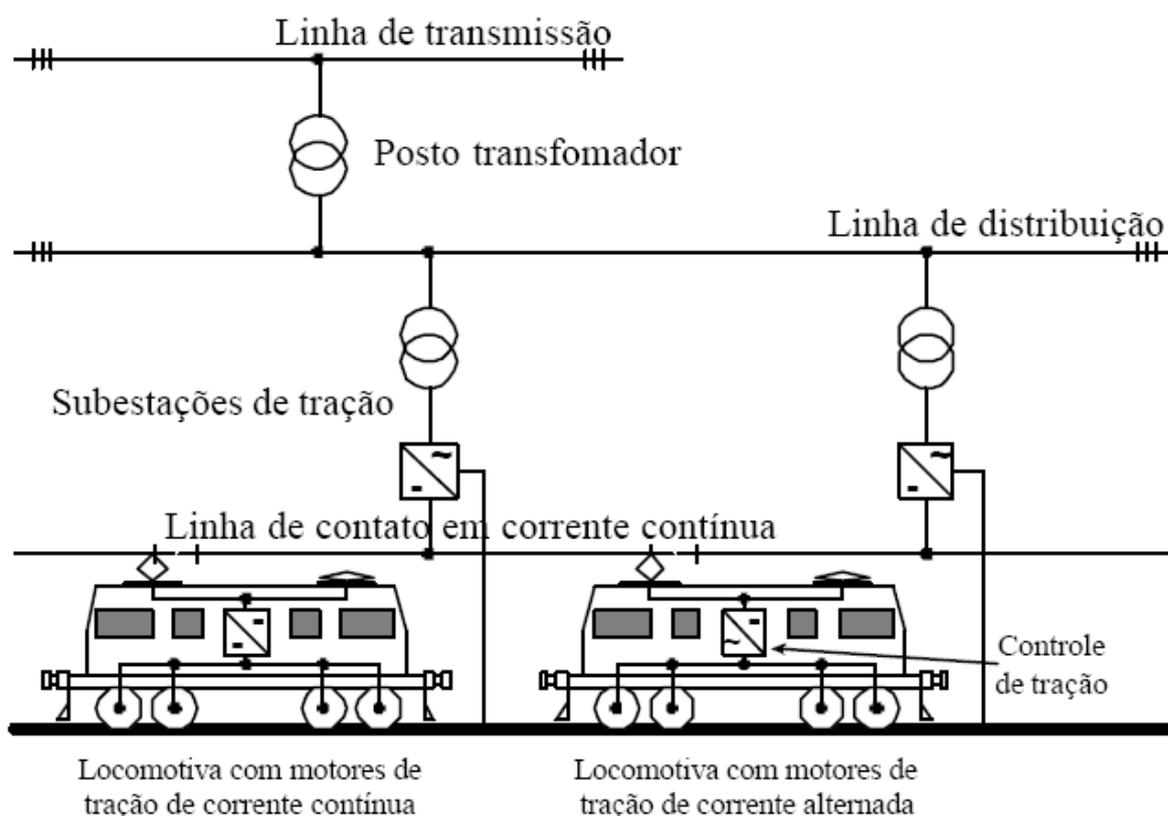


Figura 7 - Sistema de alimentação de uma locomotiva elétrica com motores de tração em corrente contínua e corrente alternada.

Fonte:(BORBA, 2007)

A tração elétrica é mais utilizada em locomotivas voltada para trens de passageiros ou em linhas montanhosas na Europa. No caso dos passageiros, para desenvolverem mais velocidade no menor período de tempo seu peso tende a ser diminuído ao máximo e aderência em marcha deve continuar alta, o motor diesel, muito pesado, tornaria o sistema ineficiente e, portanto a alimentação é remota. Para as ferrovias de carga montanhosas na Europa, são utilizadas, pois a construção de uma via permanente nova é demasiadamente cara e criaram-se locomotivas especiais para andarem nesse tipo de via, que já fora construído décadas antes. (BORBA, 2007)

2.1.2 Material sem tração

Os materiais sem tração são aqueles que são rebocados pela locomotiva, e responsáveis por carregar os produtos ou passageiros. No caso dos trens de carga, as unidades responsáveis por carregar os produtos são chamadas vagões, e no caso de passageiros são os carros de passageiros.

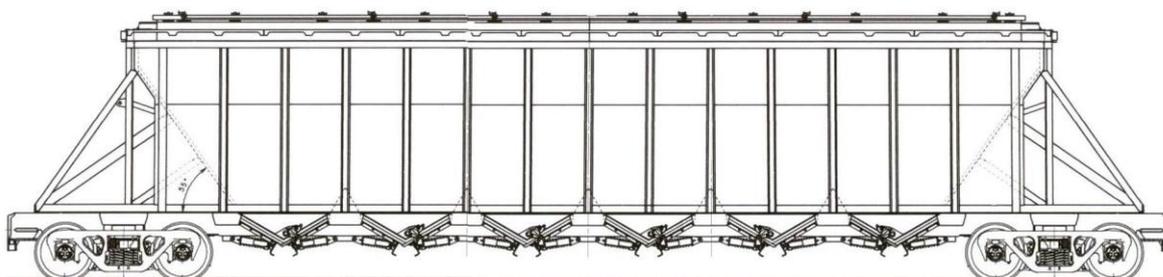


Figura 8 - Exemplo de projeto para vagões para sal, açúcar e fertilizantes.
Fonte: (AMÉRICA LATINA LOGÍSTICA, 2006)

Além dos vagões e carros de passageiros, podem ser puxados pela locomotiva em um trem os equipamentos de manutenções de via e guindastes.

2.2 CONFIABILIDADE DA OPERAÇÃO FERROVIÁRIA

A confiabilidade da operação ferroviária depende da confiabilidade de três sistemas que compõe a operação:

- Via permanente (capacidade da via, estado de manutenção dos trilhos, aparelhos de mudança de via, sinalização da via...)
- Material rodante (confiabilidade das locomotivas, confiabilidade dos vagões, confiabilidade dos equipamentos das locomotivas...)
- Humana (tempo de trabalho do maquinista, capacidade dos controladores de tráfego (CCO), manutenção dos equipamentos...).

Os três fatores isolados ou em conjunto afetam em larga escala a operação dos trens, segundo dados internos da companhia, podem atrasar em até 15% o tempo real de trânsito em relação ao tempo nominal de trânsito. Ao detalhar mais as causas dessas paradas não programadas, se pode associar duas ao material rodante como falha de locomotiva, falha de vagão e uma a operação de pátio que pode decorrer da falta de locomotivas disponíveis para formar o trem.

Analisando ainda mais profundamente essas causas, pode-se afirmar que o motivo principal das falhas e da falta de locomotivas disponíveis decorre da estratégia de manutenção das locomotivas, visto que muitos equipamentos que compõem a locomotiva são utilizados além da sua vida útil ocasionando apenas a troca de peças por manutenção corretiva. Ainda utilizam-se inspeções programadas baseadas em condição que se provou ineficiente pela equipe de manutenção não ter mecânicos com a especialização o suficiente para realizar a inspeção condizente com o nível de manutenção requerido.

2.3 ESTRUTURA DAS LOCOMOTIVAS DIESEL-ELÉTRICAS

A locomotiva diesel-elétrica é um sistema que carrega sua própria estação geradora de energia diferentemente da locomotiva elétrica que se alimenta através de cabos de uma estação geradora remota.

Esse sistema de geração da locomotiva diesel-elétrica tem como fonte primária o motor diesel que é acoplado a um gerador de energia elétrica que produz a corrente elétrica necessária para alimentar os motores elétricos de tração que giram os rotores da locomotiva e fazem ela se mover.

Nas últimas décadas, a pesquisa e desenvolvimento ferroviários sempre foram em busca de mais eficiência e maior rendimento na tração e isso resultou em locomotivas com menor ruído e vibrações, de forma a tornar o transporte mais confortável principalmente quando voltado ao transporte de passageiros, e isso se deve principalmente aos componentes intermediários como acoplamentos e engrenagens. (BORBA, 2009)

Entretanto, como o motor diesel é a fonte primária de energia da locomotiva, qualquer dano a ele ou mesmo a falha de qualquer componente que forme o motor diesel causará a parada da locomotiva e conseqüente parada do trem e a função de transporte estará prejudicada.

2.4 MOTOR DIESEL

O motor diesel ferroviário funciona com o mesmo princípio de qualquer motor diesel, ou seja, ele é um motor de combustão interna, onde a combustão acontece sob pressão em uma câmara interna ao motor. O que difere o motor movido a óleo diesel dos motores a gasolina é o método de ignição (BORBA, 2009).

O motor a gasolina, hoje amplamente usado em automóveis por todo o planeta, tem uma combustão na qual a mistura ar/gasolina é injetada e comprimida sob baixa pressão e explode devido a uma centelha elétrica aplicada no curso superior de compressão do cilindro.

O motor diesel, no entanto, tem primeiramente seu ar injetado nos cilindros do motor, que é subitamente comprimido pelo pistão de forma a aumentar sua

temperatura a um valor que permita a ignição espontânea do óleo combustível, que será injetado na câmara superior próxima à parte superior de compressão do pistão.

Os gases aquecidos resultantes dessa combustão forçam o pistão para baixo, que faz girar o eixo virabrequim e realiza o trabalho de gerar energia mecânica na ponta desse eixo, o que na locomotiva é usado pelo gerador elétrico que transforma essa energia mecânica em elétrica.

A vantagem do motor diesel sobre o motor a gasolina está na sua maior capacidade térmica, ou seja, ele produz mais trabalho utilizando menos energia, e no fato também de o óleo diesel ser mais adequado para suportar longas jornadas de esforço pesado pela sua grande capacidade de força e durabilidade. (GE Transportation, 2008)

2.4.1 Características

Todos os motores diesel são basicamente iguais, pois seguem os mesmos princípios. Os motores diesel podem ser de quatro principais aplicações: estacionários, industriais, marítimos ou veiculares. Esses últimos se encaixam os motores destinados para transporte terrestre como carros, caminhões e trens. (BORBA, 2009)

O motor diesel ferroviário dos dias atuais é um motor com 12, 16 ou 20 cilindros, dispostos em V (ângulo de 45°) e com uma velocidade média do virabrequim que vai de 400 a 1.050 rpm. A potência de tais motores já foi de menos de 1.000 HP para motores fabricados na década de 1950 se estendendo para até mais de 6.000 HP para alguns modelos fabricados nos anos 2000. (BORBA, 2007)

Os motores podem ser de dois tempos ou de quatro tempos, e como é necessário um grande volume de ar ele não pode ser simplesmente aspirado do ar, portanto são utilizados dois equipamentos os sopradores ou os turbo-alimentadores que fazem os motores diesel ferroviários soprados ou turbinados. E ainda, devido a alta temperatura que circula dentro do cilindro e que pode chegar a 500°C eles precisam ser refrigerados, e o motor ferroviário é arrefecido a água.

Para este trabalho o modelo de locomotiva foi um da *General Electric (GE)* C-30, produzido entre a metade da década de 70 e o fim da década de 80,

originalmente para os Estados Unidos e o México e que foram posteriormente compradas usadas para o Brasil. O motor presente na C-30 é um motor diesel 16-FDL7B, presente na Figura 9 e foi escolhido por ser a frota predominante na frota de locomotivas da ALL representando 73% da frota, e a quantidade de dados de falha maior. Desde janeiro de 2010 até dezembro de 2011, foram 839 falhas de peças que compõe o motor diesel e foram usadas para a construção das funções matemáticas de confiabilidade das mesmas.



Figura 9 - Motor diesel de 4 tempos de uma GE C-30
Fonte: Autoria própria

O motor da Figura 9 tem as seguintes características:

- Rotação máxima: 1.050 rpm;
- Potência: 3.000 HP;
- Cilindros: 16 dispostos em V;
- Ciclo de Trabalho: Quatro Tempos;
- Admissão de ar: Turbinado;
- Tipo de serviço: Trabalho Pesado;
- Arrefecimento: A água.

As peças que compõe o motor diesel que foi utilizado nesse trabalho serão explicadas brevemente a seguir.

2.4.2 Peças principais do motor diesel

2.4.2.1 Bloco

O bloco é a parte principal da estrutura do motor, feito em ferro fundido, que aloja as outras partes como os conjuntos de força, o virabrequim, os eixos de comando e as peças acessórias. Nele também estão alojadas todas as tubulações de óleo lubrificante, combustível e água para o arrefecimento as engrenagens que distribuem o movimento para os acessórios como as bombas de água e bomba de combustível.

Como é uma peça sólida e que serve de alojamento ele raramente falha, tendo toda a manutenção preventiva do motor diesel voltada às peças que estão alojadas nele. Ele só recebe manutenção preventiva quando o motor é desmontado devido à alguma falha grave ou acidente.



Figura 10 - Bloco do motor diesel
Fonte: Autoria própria

A sua função matemática de falha é uma exponencial, cujo gráfico está na Figura 11 e segue a função exponencial com $\lambda = 7,973E-6$.

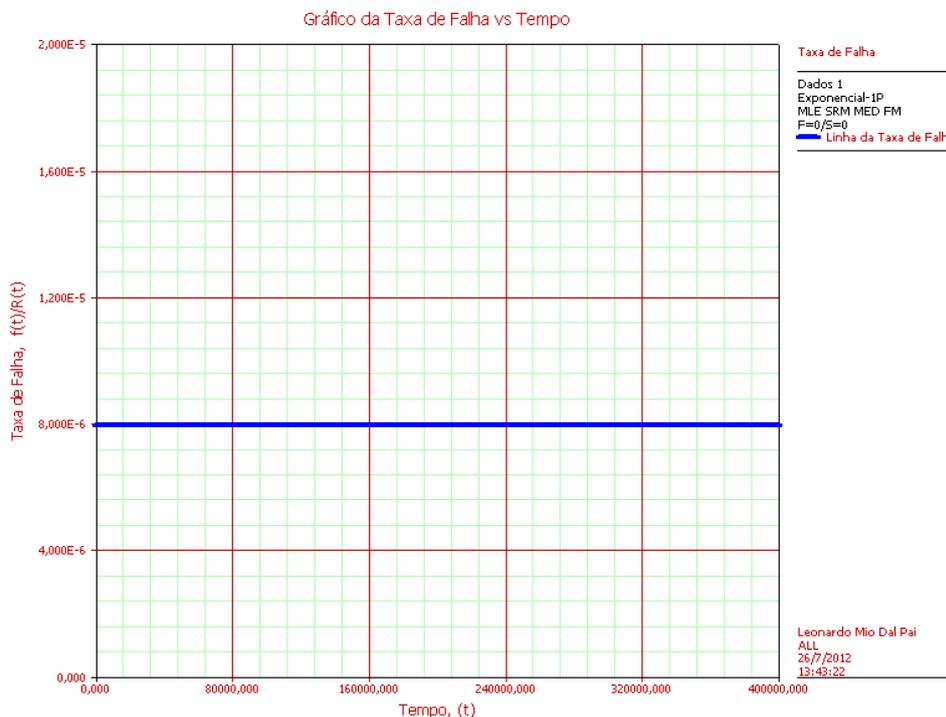


Figura 11 - Gráfico da taxa de falha do bloco do motor diesel
Fonte: Autoria própria

Como explica (UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE, 1998) e (BLISCHKE, et al., 2000), uma taxa de falha de um componente que segue uma distribuição exponencial é sempre uma constante (Equação 1), ou seja, não importa qual o tempo de vida do componente a taxa de falha será a mesma.

$$f(t) = \lambda$$

Equação 1 - Taxa de falha de uma distribuição exponencial

Em diversos componentes do motor diesel as taxas de falha serão constantes e, portanto nesses casos apenas o parâmetro será indicado e não mais o gráfico.

2.4.2.2 Eixo de Comando

Em todo motor existem dois eixos de comando das válvulas, montados um em cada lado do bloco do motor diesel e são acionados pelo virabrequim e giram na metade da rotação do mesmo, para o motor de quatro tempos. As principais funções dos eixos de comando é realizar a abertura e o fechamento no tempo exato para a admissão e o escape, e também controlar o tempo de injeção do combustível durante o ciclo de operação do cilindro.

O eixo de comando tem excêntricos que permitem a ele cumprir sua função, que para o motor de quatro tempos, são três: um para acionar a válvula de admissão, um para acionar a bomba injetora de combustível e um para acionar a válvula de escape.

A sua função de falha foi calculada utilizando o software Reliasoft Weibull++ e se adequou mais a uma função exponencial com parâmetro *lambda* (λ) de 1,39E-05.

2.4.2.3 Conjunto de Força

O conjunto de força é o conjunto de peças que juntos são responsáveis pela produção da força motriz que passa ao virabrequim. Fazem parte do conjunto de força (Figura 12) de um motor de quatro tempos a camisa, a jaqueta, o cabeçote, o pistão e os anéis de segmento, além das válvulas e da biela como mostrado na Figura 13. (AMÉRICA LATINA LOGÍSTICA, 2011)



Figura 12 - Conjunto de força de um motor diesel 4 tempos
Fonte: Autoria própria

O pistão é conectado a biela que por sua vez é ligado ao virabrequim. A explosão que ocorre dentro da camisa força o pistão para baixo e o virabrequim gira e realiza o trabalho. (BORBA, 2009)

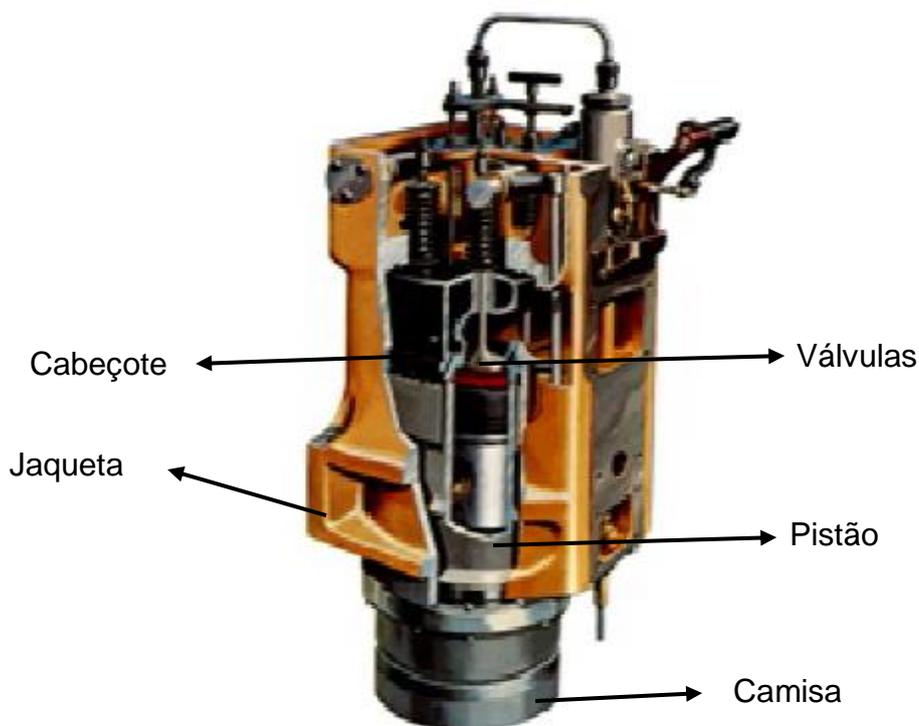


Figura 13 - Estrutura em corte do conjunto de força de um motor diesel de 4 tempos.
Fonte: (BORBA, 2007)

Há, portanto, no interior do conjunto de força um grande trabalho de desgaste mecânico quando da explosão que ocorre além de um grande esforço na conexão biela-virabrequim que recebe o movimento mecânico resultante da

explosão. Através dos dados de falha presentes na companhia, chegou-se a função de falha do conjunto inteiro excetuando a biela que teve as suas falhas discriminadas separadamente.

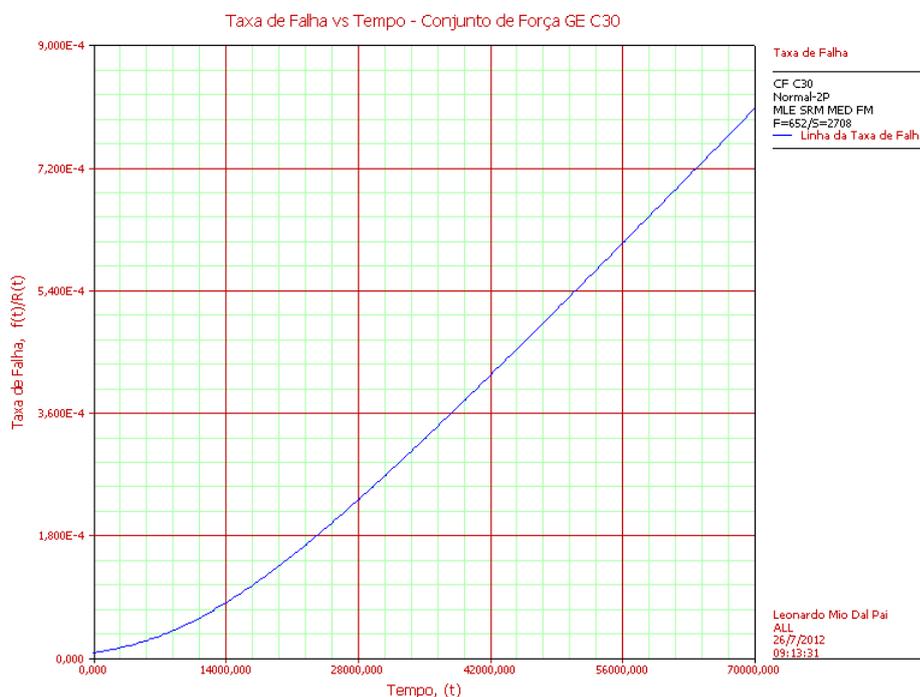


Figura 14 - Gráfico da Taxa de Falha do Conjunto de Força da GE C30
Fonte: Autoria própria

A função de falhas é uma função normal (figura 15) com os seguintes parâmetros: $\mu=1,56E+4$ e $\sigma=8,296E+3$, o que indica que a taxa de falha é crescente com o tempo segundo (BLISCHKE, et al., 2000).

2.4.2.4 Biela

A biela é uma peça de aço forjado que tem como função transmitir o movimento alternado do pistão – movimento ascendente/descendente – ao virabrequim que realiza um movimento rotativo. Por ser o ponto de contato e de transferência desse movimento ele sofre um esforço que se causar um desalinhamento na biela pode provocar a fratura do virabrequim.



Figura 15 - Conjunto biela mestre e biela articulada de um motor diesel 4 tempos
Fonte: Autoria própria

Através dos dados de falha, verificou-se que a biela comporta-se como uma função de falha exponencial, tendo falhas aleatórias e, portanto voltadas à operação do motor diesel. A função de confiabilidade foi calculada como sendo uma distribuição exponencial pelo Weibull++ e teve um parâmetro λ de $7,496E-6$.

2.4.2.5 Turbo

O sistema de admissão do motor diesel aspira o ar atmosférico através do turbo alimentador com a finalidade de elevar a pressão do ar no coletor de admissão acima da pressão atmosférica, fazendo com que, no mesmo volume seja possível depositar mais massa de ar e conseqüentemente possibilitar que maior quantidade de combustível seja injetada, resultando numa maior potência e maior torque para o motor. Como proporciona maior pressão e compressão no interior do cilindro, produz temperaturas de ignição mais altas e, portanto maior eficiência e melhor consumo de combustível, com redução de emissão de poluentes. (BORBA, 2009)

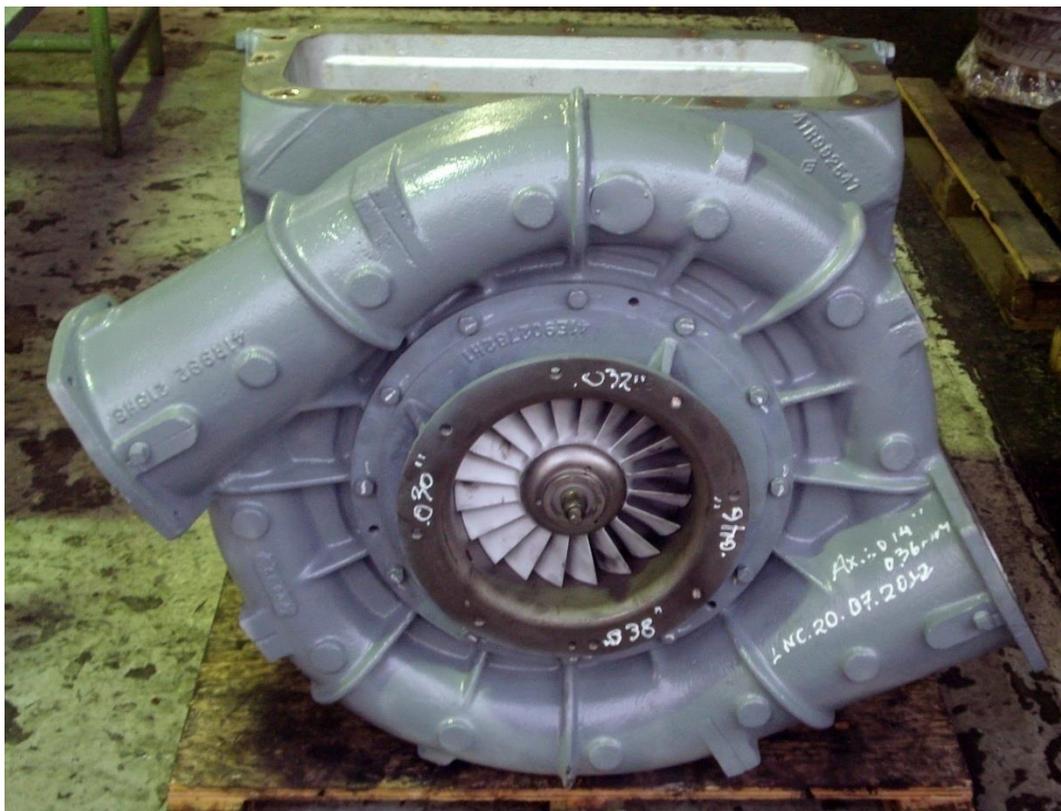


Figura 16 - Turbo de uma locomotiva modelo GE C30
Fonte: Autoria própria

O turbo (Figura 16) é uma peça acessória, mas frágil em sua concepção, pois sofre com as oscilações do motor diesel, com as vibrações da locomotiva e com a temperatura dos gases no seu interior. Assim, é uma peça que garante ampla economia, mas tem vida útil curta e se não for realizada a manutenção corretamente falhará com bastante frequência. Como ela é necessária para o início do ciclo do cilindro do motor diesel, qualquer falha no trabalho do turbo compromete o funcionamento do motor e parando a locomotiva, por isso em todo o sistema mecânico da locomotiva é considerada uma das peças mais importantes na manutenção e operação ferroviária.

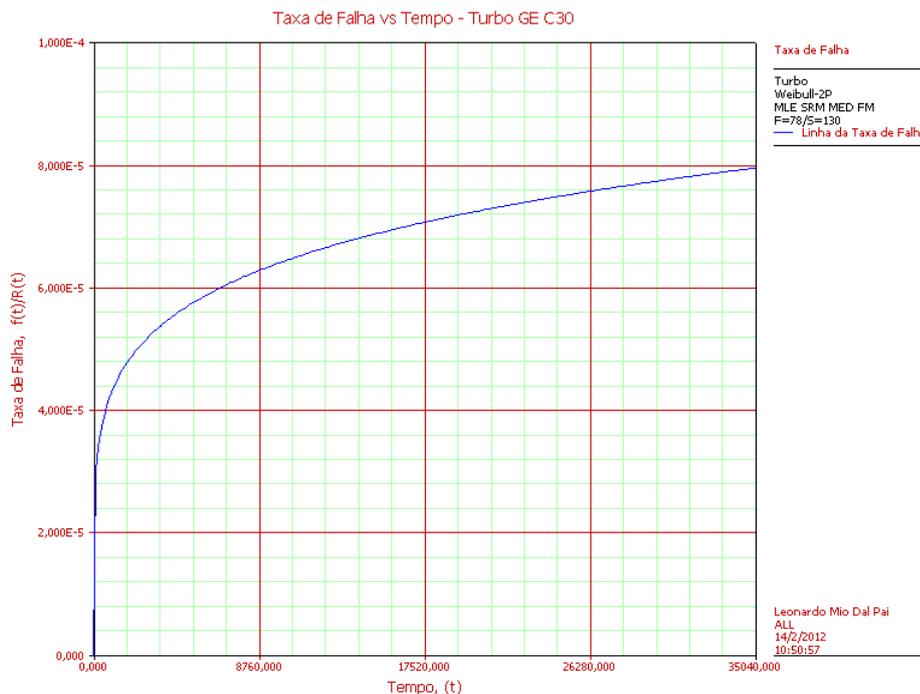


Figura 17 - Gráfico da Taxa de Falha do Turbo da GE C30
Fonte: Autoria própria

Sua função de falha responde a uma função de Weibull de dois parâmetros com os seguintes parâmetros: $\beta = 1,1703$ e $\eta = 1,6687E+4$, cujo gráfico da taxa de falha é o da Figura 17. Isso indica que o turbo sofre desgaste, por seu β ser maior que 1. (BLISCHKE, et al., 2000) Sua vida média, calculada pelo software Reliasoft Weibull++ a partir dos dados de falha da companhia, é de 15.802 horas ou pouco menos de 2 anos.

2.4.2.6 Engrenagens

Na parte dianteira do bloco, conhecida como extremidade livre, se alojam um conjunto de engrenagens de distribuição de movimentos para os acessórios externos, como o gerador auxiliar, bomba d'água e sincronismo da bomba de combustível.

Esse conjunto de três engrenagens tem como sua função de confiabilidade uma distribuição de falhas exponencial com parâmetro λ de $8,46E-6$ o que dá uma larga vida útil de 118 mil horas ou 13,5 anos.

2.4.2.7 Bomba de Óleo

Como todo conjunto de peças mecânicas, que sofrem atrito quando há o contato entre elas, deve haver a passagem de um lubrificante que forma uma película que impede esse contato direto. Além disso, o óleo lubrificante reduz a perda de pressão da câmara de combustão, auxilia o arrefecimento do motor, evita a ferrugem e o desgaste corrosivo e facilita a partida em baixas temperaturas.

Esse óleo lubrificante fica armazenado no cárter, passa por um sistema de filtros e por um resfriador de óleo até chegar à bomba principal de óleo lubrificante que fornece lubrificação pressurizada aos mancais principais do motor e remove o calor gerado pelo atrito e pela combustão. A bomba de óleo é acionada por uma das engrenagens na extremidade livre do motor diesel, e assim como a bomba d'água se assemelha muito a uma bomba tradicional de equipamentos estáticos. (BORBA, 2009)

A distribuição de falhas da bomba de óleo segue uma distribuição exponencial com parâmetro λ de $1,43E-5$.

2.4.2.8 Bomba d'Água

A circulação do líquido de arrefecimento pelo motor diesel depende de uma bomba d'água que é acionada por uma engrenagem acoplada ao eixo virabrequim. Após circular pelo motor, absorvendo calor, o líquido passa por uma bancada de radiadores que retiram esse calor e devolvem o líquido para o sistema através da bomba. (BORBA, 2009)

O mecanismo dessa bomba é simples e ela é selada mecanicamente, e geralmente as falhas dela são provenientes do mau funcionamento de outros componentes do motor ou a falhas na operação que acabam por sobrecarregar a própria bomba.

A distribuição de falhas da bomba d'água segue uma distribuição exponencial com parâmetro λ de $1,43E-5$.

2.4.2.9 Bomba Injetora

As bombas injetoras, que no caso do motor de quatro tempos de 16 cilindros são um por conjunto de força, ou seja, 16 bombas injetoras. Elas regulam o controle de injeção de combustível no cilindro durante o ciclo de admissão do motor. O combustível vem das linhas de distribuição de combustível que passam ao longo do motor e chega diretamente à bomba injetora que na sua ponta tem um bico injetor acoplado a bomba.

Se esse bico estiver desregulado será injetado mais combustível fazendo o conjunto de força trabalhar descompassado com os outros provocando uma oscilação de potência no motor diesel ou dando uma avaria no turbo pelo ar estar muito mais quente e carbonizar as paletas do turbo.

A função de falha da bomba injetora é exponencial com o parâmetro lambda igual a $2,49E-5$.

2.4.2.10 Governador

O governador é um dispositivo eletro-hidráulico que tem como função principal regular a rotação e a potência do motor diesel. É controlado remotamente pelo acelerador da locomotiva, o governador é uma unidade independente montada sobre o motor e acionada por ele. Tem um reservatório próprio de óleo lubrificante assim como uma bomba de pressão de óleo.

As duas funções básicas do governador são controlar a rotação do motor regulando a quantidade de combustível que chegam aos cilindros e manter a potência de saída do motor diesel constante, predeterminada para cada ponto de rotação, mediante o controle preciso de carga imposta ao motor. Esse controle é feito usando o sistema mostrado na Figura 18.

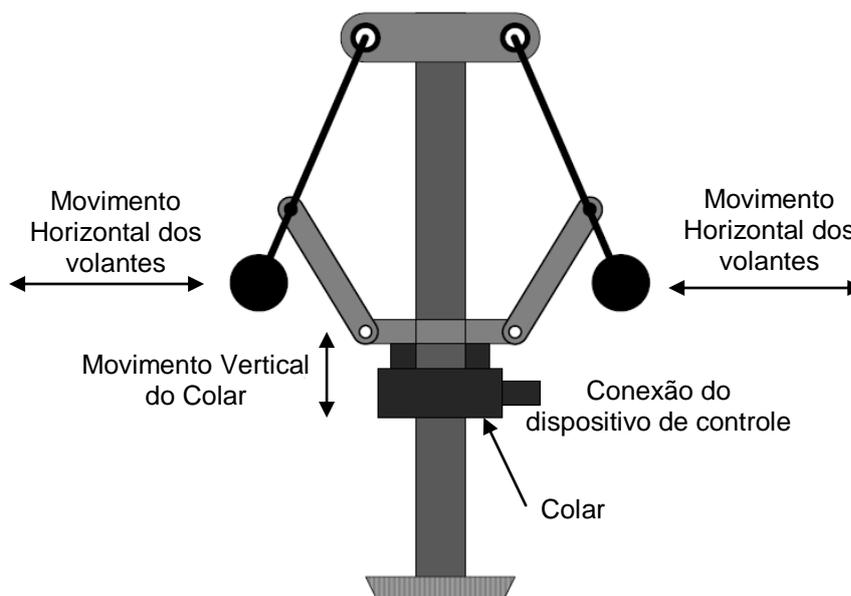


Figura 18 - Diagrama simplificado do governador. Conforme os dois volantes horizontais abrem, o colar sobe e realiza o controle da rotação do motor.
Fonte:(BORBA, 2009)

Além dessas funções, há outras funções secundárias que se resumem a controle e segurança do motor como controlar a carga aplicada ao motor para ajudar no controle de patinação das rodas e atuar no desligamento preventivo do motor diesel caso seja detectado baixa pressão do óleo lubrificante ou baixa pressão da água de arrefecimento e evitar uma avaria grave ao motor. (BORBA, 2009)

Com todas essas funções, qualquer mau-funcionamento ou avaria no governador causa um desregulamento do motor diesel provocando uma falha na locomotiva sendo os mais comuns a atuação incorreta do dispositivo de segurança de baixa pressão de óleo, não funcionamento do governador, travamento do governador e falta de óleo no governador que em todos os casos ocasiona a parada do motor diesel.

Nas locomotivas mais modernas, produzidas a partir da década de 1990, esse controle que o governador realizava é feito por um controlador eletrônico e o governador não é utilizado mais. No entanto, nas C30s que o Brasil usa até os dias de hoje ele ainda está presente.

A função de falha do governador é uma exponencial com o parâmetro λ igual a $4,21E-5$.

3 O CICLO DE VIDA DE UM COMPONENTE E SEU CUSTO

Custo do ciclo de vida é o custo total de possuir uma máquina ou equipamento, incluindo seus custos de aquisição, operação, manutenção e/ou descarte. (SAE, 1999) (NEW SOUTH WALES TREASURY DEPARTMENT, 2004) O LCC representa a soma das estimativas de custo desde o seu desenvolvimento até o descarte tanto para equipamentos como para projetos determinados por um estudo analítico de estimativas do custo total com um incremento anual durante a vida do componente considerando a variação do dinheiro no tempo. Assim, o objetivo de uma análise de LCC é a de escolher a alternativa mais barata após uma comparação com diversas alternativas de forma a alcançar o menor custo total durante a vida do componente. (BARRINGER, 2003)

Ao realizar um estudo de LCC é necessário levar em conta o valor presente líquido dos custos, considerando a depreciação, impostos e o valor presente.

3.1 BENEFÍCIOS DO LCC

O LCC ajuda a mudar visões antiquadas de problemas de operação industrial com ênfase em competitividade econômica e sempre pensando no menor custo em longo prazo o que não é uma resposta fácil de obter. Geralmente a engenharia, produção e o departamento financeiro tendem a debater e apenas olhar um único critério que melhore a sua própria área independente do que seja necessário para que ele melhore. Cabe ao gerente controlar essas áreas de forma a maximizar cada critério em busca do melhor para a companhia, e o LCC é uma ótima ferramenta para isso. (BARRINGER, 2003)

A grande pressão governamental em busca de eficiência energética e também o aumento da competitividade existente na economia atual fazem do LCC um estudo que pode certamente maximizar a produção da companhia na busca dos menores custos de operação e manutenção. O planejamento financeiro proveniente do LCC permite ao setor financeiro alocar os recursos onde eles são necessários, quando eles forem necessários, sabendo seus custos diretos e indiretos e o valor

deles no tempo, o que faz o menor custo total a variável mais importante e não apenas o custo singular de aquisição da máquina.

Nessa etapa de planejamento é possível simular fluxos de caixa, identificar problemas ao comparar diversas alternativas, conferir se a confiabilidade do equipamento é viável do ponto de vista operacional e se está alinhado com as perspectivas da empresa. (AUSTRALIAN NATIONAL AUDIT OFFICE, 2001)

3.2 ESTIMANDO O CUSTO DO CICLO DE VIDA DE UM COMPONENTE

O custo de um componente ao longo de sua vida pode ser expresso por uma fórmula simples:

$$\text{LCC} = \text{Custo de Capital} + \text{Custos de Operação} + \text{Custos de Manutenção} + \text{Custos de Descarte} - \text{Valor residual}$$

Equação 2 - Fórmula geral do custo do ciclo de vida de um componente.

Fonte: Traduzido livremente de (AUSTRALIAN NATIONAL AUDIT OFFICE, 2001)

Que representa os custos aqui chamados de aquisição e sustentação do componente, abertos nas Figura 19 e Figura 20.



Figura 19 - Custos de Aquisição do Equipamento.

Fonte: Autoria própria, baseado em (BARRINGER, et al., 1996)

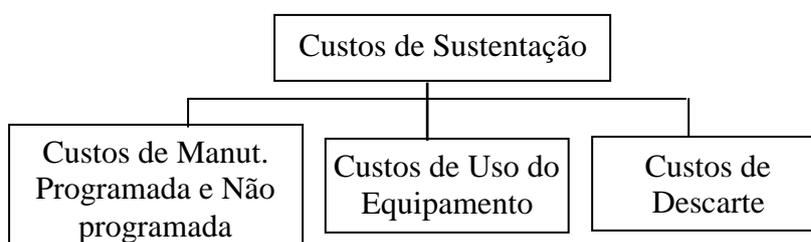


Figura 20 - Custos de Sustentação do Equipamento.

Fonte: Autoria própria, baseado em (BARRINGER, et al., 1996)

Entretanto realizar estimativas assertivas para cada variável da fórmula é uma tarefa um tanto quanto complicada devido às incertezas que surgem:

- prever a operação do equipamento ao longo de sua vida;
- a natureza e a escala dos custos operacionais;
- a necessidade e os custos de manutenção;
- o impacto da inflação nos custos individuais e agregados;
- prever qual será a vida total do ativo.

O quão mais longo é o período de vida do componente, mais difícil ficam de assumir os custos como verdade. Em suma, para componentes ferroviários a vida útil dada pelo fabricante raramente ultrapassa oito anos sendo que justamente o que tem maior vida útil e inclusive limita a vida útil da locomotiva como um todo é o motor diesel que tem como vida útil 16 anos, dependendo sempre das condições de operação. (General Electric do Brasil, 1976)(GE Transportation, 2008)

A árvore de custos apresentada nas Figura 19 e Figura 20. não são mutuamente exclusivas, ou seja, se o equipamento é adquirido ele deve ser sustentado e não pode sustentar um item que não foi adquirido. Dito isso, os custos inerentes a cada um desses custos principais são encontrados realizando análises profundas e precisas para identificar os principais causadores.

3.3 ETAPAS DO ESTUDO DO LCC

O estudo do LCC é um processo que envolve diversos custos específicos a cada situação. Nesse trabalho usaremos o processo desenvolvido por (FABRYCKY, et al., 1991) e explanado por (BARRINGER, et al., 1996) como o da Figura 21.

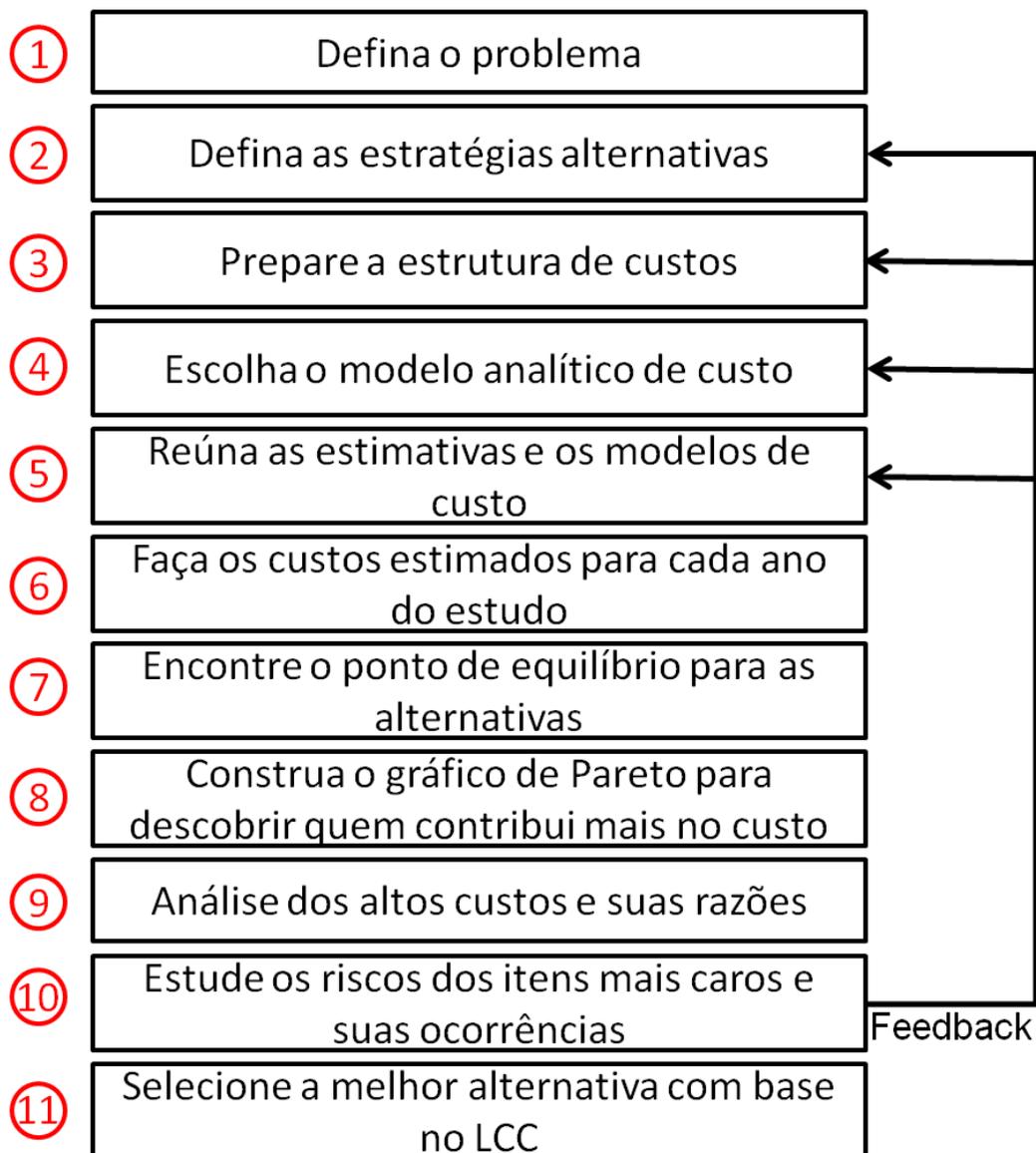


Figura 21 - Diagrama passo a passo do LCC.
Fonte: (BARRINGER, et al., 1996)

Cada etapa do estudo será explicado no próximo capítulo quando for aplicado ao motor diesel ferroviário.

4 O LCC APLICADO AO MOTOR DIESEL FERROVIÁRIO

O motor diesel de uma locomotiva configura-se como o dispositivo mais importante do mesmo, pois ele é o elemento principal do sistema gerador de energia que a locomotiva usa para tracionar e o que primeiro e mais recebe os impactos da operação da tração.

Além disso, as peças sobressalentes são caras, da ordem de milhares de reais para as peças maiores, tornando o motor diesel inteiro custando quase meio milhão de reais. Como tem um tamanho expressivo, as trocas de peças são demoradas e uma avaria grave como as que exigem a retirada do motor da locomotiva demoram de 5 até 45 dias para serem consertadas, sem contar a indisponibilidade de peças sobressalentes muitas vezes.

Esse cenário se mostrou ótimo para um estudo do custo de ciclo de vida do motor diesel de modo a otimizar essas paradas de manutenção, diminuir os custos de manutenção corretiva e de locomotiva parada. A metodologia descrita por (BARRINGER, et al., 1996) será mais bem exposta, já aplicada à estrutura do motor diesel ferroviário.

4.1 ETAPA 1: DEFINA O PROBLEMA

As locomotivas do modelo C30 utilizadas na ALL tem de vida média 30 anos, embora a grande maioria dos seus componentes internos já foi trocado mais de uma vez. Os componentes que são trocados passam por um processo de recuperação, para recondiçioná-los para operação novamente, sendo que em algumas vezes é necessário usinar a peça de volta para que ela atinja as dimensões requeridas.

Embora essa estratégia traga uma grande diminuição no custo de peças trocadas nos motores diesel, a taxa de falha desses componentes é alto e ocasiona um custo indireto na produção. Em toda a companhia, operando na bitola larga, são 223 locomotivas desse modelo. Em 2011, elas sofreram uma média de 1,88 avarias por ano o que causou uma indisponibilidade de mais de 96.419 horas, ou 5% do

tempo total máximo de operação. O impacto direto da manutenção no orçamento é da ordem de 10 milhões de reais, sem levar em conta as perdas de produção.

Busca-se com este estudo uma melhor alternativa do que a atual, uma estratégia chamada *Run-To-Failure* (traduzido livremente do inglês para “Rodar até Falhar”) que diz que o componente irá rodar até falhar e depois disso será consertado ou trocado.

4.2 ETAPA 2: DEFINA AS ESTRATÉGIAS ALTERNATIVAS

Nessa etapa são definidos os critérios de cada alternativa que influirão no custo total do motor diesel. Os componentes que terão seus custos expostos são: conjunto de força, biela, turbo, virabrequim, bloco, eixo de comando, engrenagens, bomba de óleo, bomba d’água, bomba injetora, governador e outros componentes que entrarão em conjunto por representarem pouco em impacto operacional e financeiro. Além disso, os custos de consumo de óleo lubrificante e óleo combustível também serão contados visto que nas três últimas alternativas, peças com menos desgaste consomem menos óleo lubrificante e tem uma leve economia de óleo diesel.(BORBA, 2009)

a) **Alternativa 1 (atual):** Fazer apenas Manutenção Corretiva: Quando quebrar, troca, pontualmente. Os critérios atuais dos componentes do motor diesel são conforme a Tabela 1:

Tabela 1 – Tempos médios de falha e de reparo da alternativa 1.

Componente	Tempo Médio para Falhar (em horas)	Tempo para Reparo (em horas)
Conjunto de Força	27.203	84,21
Biela	133.390	372,10
Turbo	21.466	253,70
Virabrequim	125.450	1102,20
Bloco	125.450	1102,20
Eixo de Comando	72.108	40,70
Engrenagens	118.142	72,02
Bomba de Óleo	69.851	63,43
Bomba d’Água	69.851	55,52
Bomba Injetora	40.227	24,37
Governador	23.775	36,42

Fonte: A autoria própria a partir de dados de falha de locomotivas ALL

b) **Alternativa 2:** Ter estoque de peças sobressalentes no posto, com a mesma qualidade das de hoje. Portanto o tempo de reparo dos componentes é menor, segundo a Tabela 2:

Tabela 2 – Tempos de Reparo estimados para a alternativa 2.

Componente	Tempo Médio para Falhar (em horas)	Tempo para Reparo (em horas)
Conjunto de Força	27.203	60,15
Biela	133.390	265,79
Turbo	21.466	126,85
Virabrequim	125.450	1102,20
Bloco	125.450	1102,20
Eixo de Comando	72.108	29,07
Engrenagens	118.142	51,44
Bomba de Óleo	69.851	45,31
Bomba d'Água	69.851	39,66
Bomba Injetora	40.227	17,41
Governador	23.775	26,01

Fonte: Autoria própria a partir de dados de falha de locomotivas ALL

Ao necessitar de um estoque de peças para diminuir o tempo médio de reparo, três custos adicionais são associados a essa alternativa: custo de estoque das peças, custo das peças sobressalentes e custo do aumento de produção das peças.

c) **Alternativa 3:** Fazer manutenção preventiva do motor diesel, com uma intervenção intermediária e manter estoque de sobressalentes com a mesma qualidade de hoje.

A diferença em relação à alternativa 2 está em fazer intervenções programadas de manutenção preventiva nos componentes do motor de modo a evitar falhas da locomotiva, além de fazer uma revisão geral a cada oito anos. Com isso mais três custos são associados a essa alternativa: Manutenção de uma equipe adicional para a revisão, custo de treinamento da equipe e o custo de manter um motor diesel inteiro em estoque.

d) Alternativa 4: Fazer manutenção preventiva do motor diesel, com uma intervenção intermediária e manter estoque de sobressalentes mas com uma qualidade melhor que a de hoje.

O tempo de reparo dos componentes ainda se mantém igual ao das alternativas 2 e 3, mudando o tempo médio para falhar segundo a Tabela 3.

Tabela 3 – Tempos de Reparo estimados para a alternativa 4.

Componente	Tempo Médio para Falhar (em horas)	Tempo para Reparo (em horas)
Conjunto de Força	52.560	60,15
Biela	181.332	265,79
Turbo	40.172	126,85
Virabrequim	181.332	1102,20
Bloco	282.948	1102,20
Eixo de Comando	114.822	29,07
Engrenagens	175.200	51,44
Bomba de Óleo	69.851	45,31
Bomba d'Água	69.851	39,66
Bomba Injetora	40.227	17,41
Governador	40.172	26,01

Fonte: Autoria própria a partir de dados de falha de locomotivas ALL

O fato das peças serem de melhor qualidade indica que elas serão também mais caras, porém sua vida útil também é maior e o intervalo da manutenção preventiva será maior. Porém além dos outros custos já presentes nas alternativas 2 e 3, o custo maior das peças também entrará no estudo da alternativa 4. Tais custos serão apresentados na etapa 5 com as estimativas e os modelos de custo de cada item.

A partir do uso de peças novas, que não desgastam com a mesma velocidade que as peças recondiçionadas, há uma economia de consumo de óleo lubrificante que cai dos atuais 1,5% para 0,9% em uma relação litros de óleo lubrificantes consumidos sobre litros de óleo diesel consumidos.

e) Alternativa 5: Fazer manutenção preventiva do motor diesel, colocando um motor diesel com tecnologia eletrônica embarcada no lugar, e também com uma intervenção intermediária e manter estoque de sobressalentes mas com uma qualidade melhor que a de hoje.

O motor diesel eletrônico é o que equipa as locomotivas modernas, produzidas desde a década de 1990, e que vem com um controle de injeção eletrônica, melhor controle de potência e dos dispositivos de segurança do motor. No entanto, esse motor diesel custa 4 vezes mais do que um motor diesel ferroviário convencional.

Por consequência desse melhor controle, o motor diesel eletrônico apresenta uma leve economia de consumo de óleo diesel de 5%. Outra diferença em relação a alternativa 4 está no tempo maior de vida útil do turbo e da bomba injetora, que serão o dobro do motor diesel convencional. (GE Transportation, 2008)

4.3 ETAPA 3: PREPARE A ESTRUTURA DE CUSTOS

Os custos que irão inferir para cada alternativa serão abertos a seguir, seguindo as estruturas citadas nas Figura 19 e Figura 20, como custos de aquisição e custos de sustentação.

Para a alternativa 1, que é a estratégia atual os custos serão alocados nas categorias da Figura 22.



Figura 22 - Categorias de custo para a alternativa 1.

Fonte: Autoria própria, baseado em (BARRINGER, et al., 1996)

Para a alternativa 2, que contempla o aumento de estoque de peças sobressalentes mas ainda mantendo apenas manutenção corretiva como estratégia, os custos recorrentes são os da Figura 23.

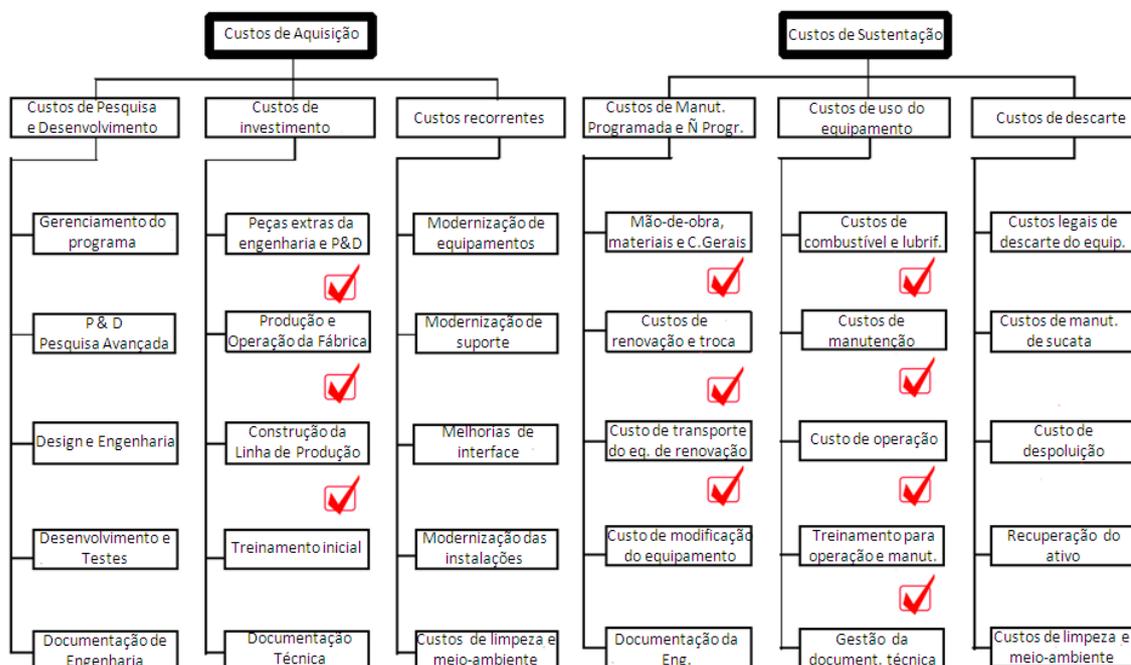


Figura 23 - Categorias de custo para a alternativa 2
Fonte: Autoria própria, baseado em (BARRINGER, et al., 1996)

Para o caso da alternativa 3, onde se aplica a primeira estratégia de manutenção preventiva de componentes além da nova estratégia de aumento de estoque também aplicada a alternativa 2, os custos inferem conforme a Figura 24.

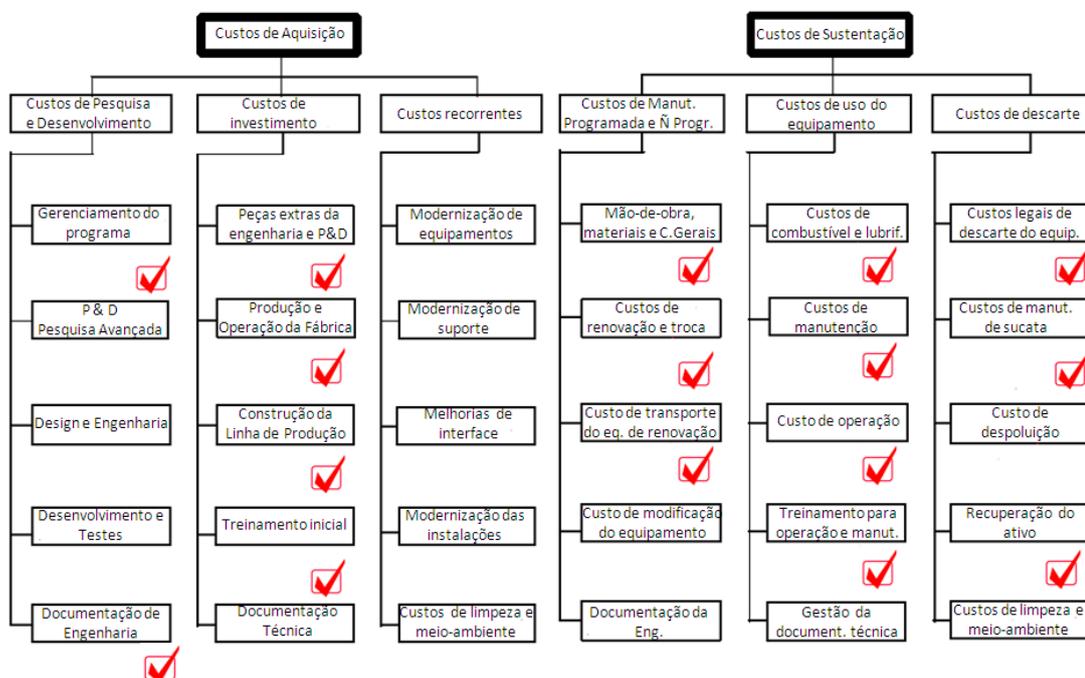


Figura 24 - Categorias de custo para a alternativa 3
Fonte: Autoria própria, baseado em (BARRINGER, et al., 1996)

Na alternativa 4, além das políticas de sobressalentes e de realizar manutenção preventiva, agora as peças terão um maior controle de qualidade de modo a aumentar a sua confiabilidade e diminuir as falhas do motor. Estão classificados na Figura 25.

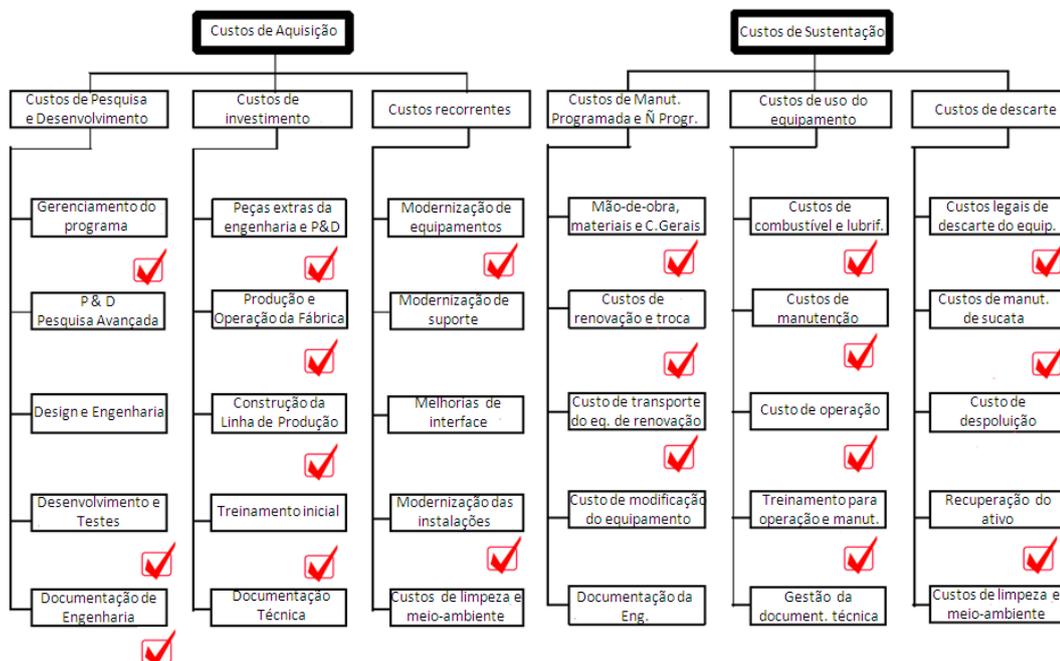


Figura 25 - Categorias de custo para a alternativa 4
Fonte: Autoria própria, baseado em (BARRINGER, et al., 1996)

A alternativa 5 (Figura 26 - **Categorias de custo para a alternativa 5**) contempla tudo que a alternativa 4 contempla, mas ela usa um motor diesel mais moderno que tem um sistema de injeção eletrônica.

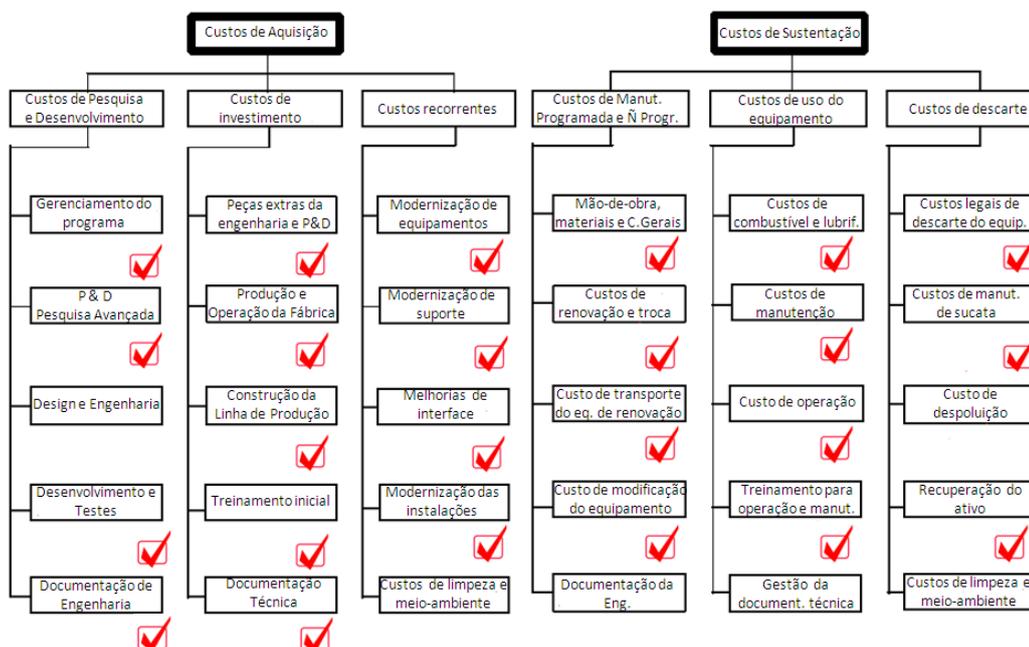


Figura 26 - Categorias de custo para a alternativa 5
Fonte: Autoria própria, baseado em (BARRINGER, et al., 1996)

4.4 ETAPA 4: ESCOLHA O MODELO ANALÍTICO DE CUSTO

O modelo analítico de custo escolhido para representar o estudo é uma planilha de engenharia, que irá somar as estimativas de falha e de custo para preparar os custos para trazer ao valor presente líquido (VPL). Os dados de tempo médio para falhar expostos na seção 4.2 e os custos associados.

A planilha de falhas e custos será a base para a comparação de todos os custos e será nela também que serão construídas todas as etapas seguintes.

4.5 ETAPA 5: REÚNA AS ESTIMATIVAS E O MODELOS DE CUSTO

Nessa etapa é onde todos os custos são unidos, componente a componente para depois serem somados e formarem o custo total de cada alternativa.

Pode-se separar os custos em dois: os custos diretos no orçamento e os custos de oportunidade. Os primeiros são aqueles que impactam direto no orçamento da empresa, como os custos de consumo de combustível e lubrificante, peças para manutenção corretiva e preventiva. Enquanto os custos de oportunidade são os custos de perda de produção ou o que a empresa deixou de ganhar com as horas paradas para manutenção.

$$\text{Custo Total} = \text{Custo Orçamento} + \text{Custo Oportunidade}$$

Equação 3 - Custo Total do Ciclo de Vida de um componente

Abrindo o item “Custo Orçamento” para cada componente:

$$\text{Custo Orçamento} = Nf * CP\zeta * (HMC * HH) * N$$

Equação 4 - Detalhamento do Custo Orçamento de cada componente

Sendo: Nf = Número de Falhas Esperado;

CP ζ = Custo da peça;

HMC = Horas Efetivas em MC;

HH = Homem-hora;

N = Número de peças por Locomotiva;

E o “Custo Oportunidade” para cada componente:

$$\text{Custo Oportunidade} = (Nf * CHpL * MTTR) + (Nf * RIt * CHpT)$$

Equação 5 - Detalhamento do Custo Oportunidade de cada componente

Sendo: Nf = Número de Falhas Esperado;

CHpL = Custo da hora parada de locomotiva em manutenção, em reais;

MTTR = Tempo médio para reparo, em horas;

RIt = Relação de impacto/trocas;

CHpT = Custo da hora parada do trem em operação, em reais;

Segundo dados internos da ALL, o custo do H.H. (homem-hora) de um mecânico é de R\$ 22,85. Outros dois custos que formam o custo de oportunidade serão importantes são o do lucro marginal por locomotiva parada no posto de manutenção e por trem parado por falha de uma locomotiva. O primeiro é de R\$ 619,17 para cada hora parada no posto. O segundo é de R\$ 22.966,29 por hora de trem parado. Essa diferença de valores se dá que no primeiro caso são trens que deixam de serem formados por falta de locomotiva disponível, por elas estarem paradas em manutenção, enquanto no segundo caso o trem já está formado e circulando pela via e a falha de uma das locomotivas para a circulação e atrasa não só o trem que ele participa como todos os outros trens que trafegam na mesma via, causando um efeito cascata, porém ambos os casos são custos de perda de produção que entram nos custos de oportunidade.

A classificação das “Horas efetivas em MC” dispõe sobre o tempo efetivo que a locomotiva fica em manutenção durante uma manutenção corretiva em relação ao tempo total de reparo (MTTR). Há ainda outro fator de ajuste que é a relação de impacto/trocas (RIt). Quando um componente falha e causa indisponibilidade da locomotiva, não necessariamente foi durante a operação de uma locomotiva em trem, ou seja, não houve impacto no trecho, o componente falhado pode ter causado a indisponibilidade da locomotiva durante uma inspeção

onde a locomotiva já se encontrava em manutenção. Assim o único custo de oportunidade associado essa falha vem do custo da locomotiva parada no posto.

O propósito é comparar um ciclo de vida de 12 anos para o motor diesel ferroviário, então para todas as alternativas o custo será estendido para esse período.

Alternativa 1 – Fazer apenas manutenção corretiva.

Os custos que compõe o custo total da alternativa 1 são: consumo de óleo diesel, consumo de óleo lubrificante, conjunto de força, biela, turbo, virabrequim, bloco, eixo de comando, engrenagens, bomba de óleo, bomba d'água, bomba injetora, governador e outros componentes menores.

Como explicado nas seções 2.4.2.3 e 2.4.2.5, o conjunto de força e o turbo são os únicos componentes que seguem a uma distribuição diferente da exponencial, portanto tem probabilidade de falha igual com o tempo. Eles seguem uma distribuição de Weibull, ou seja, a probabilidade de falha desses componentes cresce com o tempo. (UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE, 1998)

A Tabela 4 contém os custos referentes aos componentes com distribuição exponencial da alternativa 1. Tais dados vêm do sistema de dados de falha que a ALL dispõe, chamado de grupo de análise de falhas e foram tratados para chegar aos valores-base de cada componente.

A Tabela 5 contém as probabilidades condicionais de falha para o conjunto de força e para o turbo, ou seja, se um componente funcionou um ano, qual a probabilidade dele falhar no próximo ano. Esses valores foram calculados com a ajuda de um software específico de confiabilidade, o Reliasoft Weibull++.

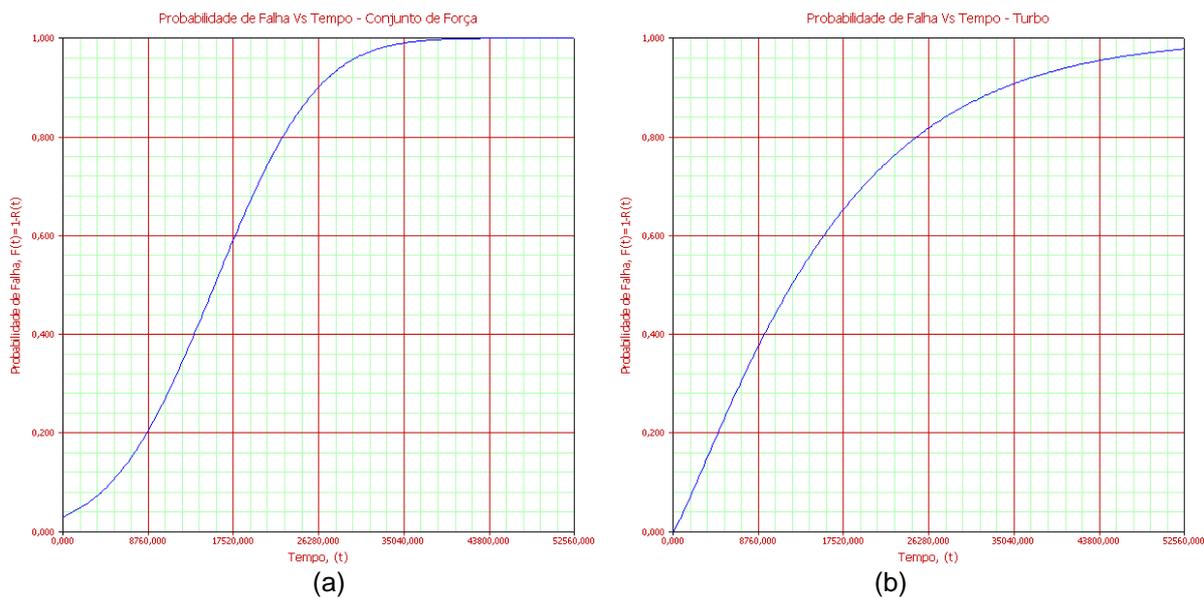


Figura 27 - (a) Gráfico de probabilidade de falha do conjunto de força, para 6 anos. (b) Gráfico de probabilidade falha de turbo, para 6 anos.

Fonte: Autoria própria

Com os valores presentes nas Tabela 4 e Tabela 6, pode-se chegar aos valores do custo total anual para cada um dos 12 anos de operação do motor diesel, que serão apresentados na etapa 6. O detalhamento dos cálculos dos componentes com custos variáveis, conjunto de força e turbo, está aberto no apêndice A.

Tabela 4 – Custos dos componentes do motor diesel para a alternativa 1.

Componente	N	MTTF (horas)	MTTR (horas)	Horas efetivas em MC	Custo Peça	Custo Mão de Obra	Relação Impacto/Trocas	Lucro marginal locom. parada	Lucro marginal trem parado
Óleo combustível	1	-	-	-	R\$ 578.577,60	-	-	-	-
Óleo Lubrificante	1	-	-	-	R\$ 48.723,00	-	-	-	-
Conjunto de força	16	27.203	84,21	7	R\$ 5.407,91	R\$ 159,95	0,1716	Ver tabela 6	Ver tabela 6
Biela	16	133.390	372,10	9	R\$ 2.006,86	R\$ 205,65	0,0357	R\$ 15.130,40	R\$ 861,85
Turbo	1	21.466	253,70	9	R\$ 31.463,07	R\$ 205,65	0,4382	Ver tabela 6	Ver tabela 6
Virabrequim	1	125.450	1102,20	36	R\$ 90.000,00	R\$ 822,60	1,0000	R\$ 47.654,48	R\$ 1.603,70
Bloco	1	125.450	1102,20	36	R\$ 30.000,00	R\$ 822,60	1,0000	R\$ 47.654,48	R\$ 1.603,70
Eixo de comando	2	72.108	40,70	3	R\$ 977,20	R\$ 68,55	0,0526	R\$ 3.061,43	R\$ 293,69
Engrenagens	1	118.142	72,02	8	R\$ 3.055,44	R\$ 182,80	0,9231	R\$ 3.306,45	R\$ 1.571,91
Bomba de óleo	1	69.851	63,43	6	R\$ 4.590,00	R\$ 137,10	0,2632	R\$ 4.925,34	R\$ 757,95
Bomba d'água	1	69.851	55,52	6	R\$ 1.606,70	R\$ 137,10	0,1613	R\$ 4.311,13	R\$ 464,55
Bomba injetora	16	40.227	24,37	1	R\$ 117,65	R\$ 22,85	0,0435	R\$ 3.285,88	R\$ 3.479,12
Governador	1	23.775	36,42	3	R\$ 1.090,93	R\$ 68,55	0,1939	R\$ 8.308,71	R\$ 1.640,60
Outros	1	86.441	59,07	1,5	R\$ 4.581,21	R\$ 34,28	1,0000	R\$ 3.706,46	R\$ 2.327,41

Fonte: Autoria própria

Tabela 5 – Probabilidades condicionais dos componentes com taxa de falha variável da alternativa 1.

Componente	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Conjunto de Força	16	20,46%	48,60%	75,75%	90,34%	96,46%	98,76%	99,57%	99,86%	99,95%	99,98%	100%	100%
Turbo	1	37,52%	44,47%	47,42%	49,39%	50,89%	52,09%	53,10%	53,97%	54,73%	55,41%	56,03%	56,59%

Fonte: Autoria própria

Tabela 6 – Custos de oportunidade do conjunto de força (CF) e do turbo da alternativa 1.

Custo Oportunidade	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
CF – Locomotiva	R\$170.687	R\$357.412	R\$397.468	R\$347.064	R\$358.339	R\$364.440	R\$359.531	R\$360.292	R\$360.997	R\$360.550	R\$360.587	R\$360.665
CF – Trem	R\$ 12.511	R\$ 26.199	R\$ 29.135	R\$ 25.440	R\$ 26.266	R\$ 26.714	R\$ 26.354	R\$ 26.410	R\$ 26.461	R\$ 26.429	R\$ 26.431	R\$ 26.437
Turbo – Locomotiva	R\$ 58.938	R\$ 65.759	R\$ 66.893	R\$ 67.219	R\$ 67.316	R\$ 67.343	R\$ 67.351	R\$ 67.353				
Turbo – Trem	R\$ 3.663	R\$ 4.087	R\$ 4.157	R\$ 4.177	R\$ 4.183	R\$ 4.185	R\$ 4.186					

Fonte: Autoria própria

Alternativa 2 – Estoque de sobressalentes.

Com relação à alternativa 1, a alternativa 2 contempla três custos a mais: custo do aumento de produção de peças sobressalentes, custos das peças sobressalentes e custo de estoque das peças sobressalentes. Esses custos diretos a mais serão compensados por diminuir em cerca de 30% a 50% o tempo médio de reparo da locomotiva o que diminui os custos de oportunidade de locomotiva parada, mas mantém-se igual os custos de oportunidade do trem parado, pois como a qualidade das peças é a mesma, a probabilidade de falhas dos componentes se mantém a mesma.

O custo das peças sobressalentes é o de 10 turbos, 60 conjuntos de força, 60 bielas, 2 virabrequins, 2 blocos de motor diesel, 30 eixos de comando e 30 engrenagens, o que dá um total de R\$ 1.257.932,29. O custo de estoque é de manutenção de um pequeno almoxarifado que foi estimado em 60 mil reais por ano. O custo de aumento de produção é o de aumentar 25 pessoas na produção interna de componentes, além dos custos de novos equipamentos, o que nos dá um custo total anual de 269.400 reais. Todos esses custos são divididos igualmente entre a frota de 223 locomotivas que usam esse motor, as GE C-30. Cada motor diesel ficará com $1/223$ do custo de cada componente.

Assim, a estratégia da alternativa 2 não evita que falhe menos, mas quando falhar ele retorna mais rápido em operação. Ou seja, ainda é trocar os componentes apenas quando o componente falhar, mas nesse caso, como haverá um número maior de peças sobressalentes em estoque, o tempo de retenção da locomotiva em posto de manutenção será menor. Os dois únicos componentes que não tem seu tempo de reparo mantido, são o virabrequim e o bloco do motor diesel, e isso se dá devido à complexidade da manutenção que mesmo com uma peça sobressalente o tempo não é reduzido.

Tabela 7 – Custos dos componentes do motor diesel da alternativa 2.

Componente	N	MTTF (horas)	MTTR (horas)	Horas efetivas em MC	Custo Peça	Custo Mão de Obra	Relação Impacto/Trocas	Lucro marginal locom. parada	Lucro marginal trem parado
Óleo combustível	1	-	-	-	R\$ 578.577,60	-	-	-	-
Óleo Lubrificante	1	-	-	-	R\$ 48.723,00	-	-	-	-
Conjunto de força	16	27.203	60,15	7	R\$ 5.407,91	R\$ 159,95	0,1716	Ver tabela 8	Ver tabela 8
Biela	16	133.390	265,79	9	R\$ 2.006,86	R\$ 205,65	0,0357	R\$ 10.807,60	R\$ 861,85
Turbo	1	21.466	126,85	9	R\$ 31.463,07	R\$ 205,65	0,4382	Ver tabela 8	Ver tabela 8
Virabrequim	1	125.450	1102,20	36	R\$ 90.000,00	R\$ 822,60	1,0000	R\$ 47.654,48	R\$ 1.603,70
Bloco	1	125.450	1102,20	36	R\$ 30.000,00	R\$ 822,60	1,0000	R\$ 47.654,48	R\$ 1.603,70
Eixo de comando	2	72.108	29,07	3	R\$ 977,20	R\$ 68,55	0,0526	R\$ 2.186,63	R\$ 293,69
Engrenagens	1	118.142	51,44	8	R\$ 3.055,44	R\$ 182,80	0,9231	R\$ 2.361,62	R\$ 1.571,91
Bomba de óleo	1	69.851	45,31	6	R\$ 4.590,00	R\$ 137,10	0,2632	R\$ 3.518,32	R\$ 757,95
Bomba d'água	1	69.851	39,66	6	R\$ 1.606,70	R\$ 137,10	0,1613	R\$ 3.079,60	R\$ 464,55
Bomba injetora	16	40.227	17,41	1	R\$ 117,65	R\$ 22,85	0,0435	R\$ 2.347,44	R\$ 3.479,12
Governador	1	23.775	26,01	3	R\$ 1.090,93	R\$ 68,55	0,1939	R\$ 5.933,81	R\$ 1.640,60
Outros	1	86.441	42,01	1,5	R\$ 4.581,21	R\$ 34,28	1,0000	R\$ 3.706,46	R\$ 2.327,41
Custo Estoque	0,004	-	-	-	R\$ 60.000,00	R\$ 269,06	-	-	-
Aumento produção	0,004	-	-	-	R\$ 269.400,00	R\$ 1.208,07	-	-	-
Peças sobressalentes	0,004	-	-	-	R\$ 1.257.932,39	R\$ 5.640,95	-	R\$ 676,91	-

Fonte: Autoria própria

Tabela 8 – Custos de oportunidade do conjunto de força (CF) e do turbo da alternativa 2.

Custo Oportunidade	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
CF – Locomotiva	R\$121.918	R\$255.294	R\$283.905	R\$247.903	R\$255.956	R\$260.314	R\$256.807	R\$257.351	R\$257.855	R\$257.535	R\$257.561	R\$257.612
CF – Trem	R\$ 12.511	R\$ 26.199	R\$ 29.135	R\$ 25.440	R\$ 26.266	R\$ 26.714	R\$ 26.354	R\$ 26.410	R\$ 26.461	R\$ 26.429	R\$ 26.431	R\$ 26.437
Turbo – Locomotiva	R\$ 29.468	R\$ 32.879	R\$ 33.446	R\$ 33.609	R\$ 33.658	R\$ 33.671	R\$ 33.675	R\$ 33.676				
Turbo – Trem	R\$ 3.663	R\$ 4.087	R\$ 4.157	R\$ 4.177	R\$ 4.183	R\$ 4.185	R\$ 4.186					

Fonte: Autoria própria.

Os custos associados a essa alternativa estão presentes na Tabela 7, enquanto a probabilidade de falhas do conjunto de força e do turbo ainda são os mesmos presentes dos da Tabela 5 e os novos custos de oportunidade dos mesmos estão na Tabela 8. Os detalhes da alternativa 2 estão presentes no apêndice B.

Alternativa 3 – Manutenção preventiva de componentes e estoque de sobressalentes.

A alternativa 3 contempla uma mudança primordial na manutenção do motor diesel que é a adoção da política de manutenção preventiva para os componentes do motor diesel seguindo as especificações do fabricante, a GE, quanto ao tempo de troca. No entanto, as peças continuam as mesmas e, portanto, sua confiabilidade também se mantém a mesma. A manutenção preventiva previne que algumas falhas sejam evitadas já que o componente será trocado com um residual de vida útil, como detalhado no apêndice C.

O Quadro 1 indica o tempo de vida que cada componente deve ser trocado segundo (General Electric do Brasil, 1976).

Componente	Troca preventiva (anos)	Troca preventiva (horas)
Conjunto de Força	4	35040
Turbo	2	17520
Biela	4	35040
Bomba de Óleo	4	35040
Bomba d'água	4	35020
Bomba injetora	2	17520

Quadro 1 - Tempos de troca preventiva dos componentes para a alternativa 3.
Fonte: (General Electric do Brasil, 1976)

Além dos custos já presentes nas alternativas 1 e 2, mais três custos são contemplados na alternativa 3: Custo de uma equipe adicional de revisão de motor diesel, custo de treinamento constante da equipe de revisão e custo de estoque do motor diesel. A equipe adicional de revisão é constituída de cinco mecânicos especializados em manutenção dos motores diesel, que fará a troca preventiva dos componentes no seu devido tempo e tem um custo anual de 9.140 reais. Essa equipe é diferente da que já faz as manutenções regulares nas locomotivas avariadas, e terá um treinamento constante que tem um custo 6.625 reais por ano. O custo de oportunidade de estoque do motor diesel se refere ao custo de

oportunidade do motor diesel parado em estoque, ou seja, quanto a companhia estaria deixando de ganhar se aplicasse o mesmo dinheiro dos dois motores diesel em uma aplicação financeira. Segundo (VOLMANN, et al., 1997), esse dinheiro aplicado renderia entre 5% e 15% ao ano. O departamento financeiro da companhia indicou que esse índice seria de 12% ao ano. O custo anual, portanto, é de 53.400 reais que dividido por cada motor é de 478,92 reais. A mesma teoria pode ser aplicada para o estoque das peças sobressalentes, o que dá um custo de 676,91 reais por motor diesel.

O consumo de óleo lubrificante tem uma leve queda devido ao uso menos constante de peças desgastadas o que favorece o maior uso de lubrificantes. Como as peças são trocadas antes do fim da sua vida útil, elas não entram em um estágio de desgaste excessivo onde o consumo é muito grande. Ao fazer essa troca preventiva no tempo correto, o índice se mantém até 40% abaixo do que apenas fazendo manutenção corretiva.

A saída de fluxo de caixa por trocas preventivas acontece no 1º ano, 3º, 5º, 7º, 9º e 11º anos de operação como mostrado na Figura 28. No primeiro ano é quando se colocam peças recém-recondicionadas e depois ocorrem trocas preventivas conforme o tempo de vida do componente seguindo o estipulado no Quadro 1.

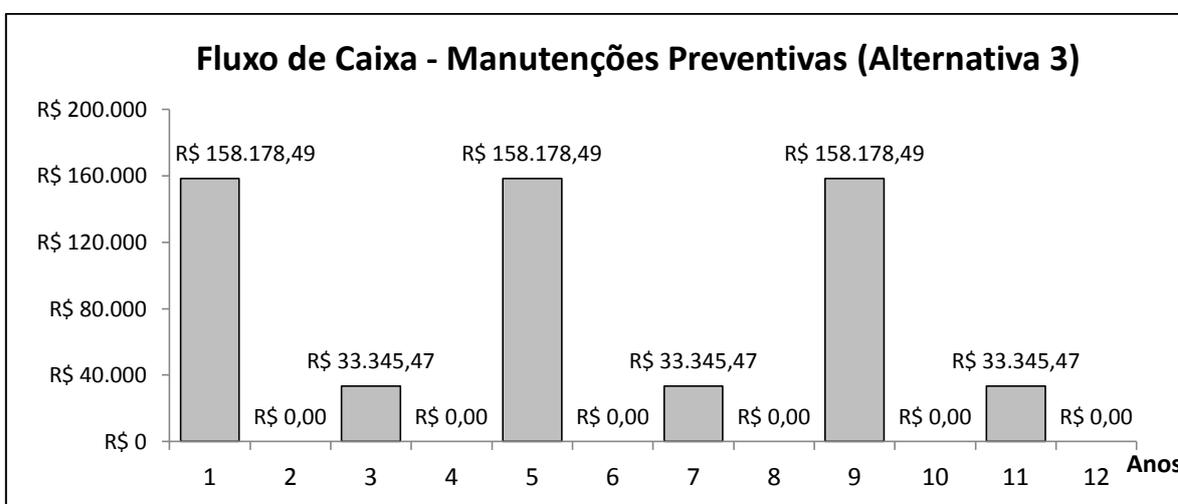


Figura 28 - Fluxo de caixa por ano das manutenções preventivas da alternativa 3.
Fonte: Autoria própria

Tabela 9 – Custos dos componentes do motor diesel da alternativa 3.

Componente	N	MTTF (horas)	MTTR (horas)	Horas efetivas em MC	Custo Peça	Custo Mão de Obra	Relação Impacto/Trocas	Lucro marginal locom. parada	Lucro marginal trem parado
Óleo combustível	1	-	-	-	R\$ 578.577,60	-	-	-	-
Óleo Lubrificante	1	-	-	-	R\$ 28.029,00	-	-	-	-
Conjunto de força	16	27.203	60,15	7	R\$ 5.407,91	R\$ 159,95	0,1716	Ver tabela 10	Ver tabela 10
Biela	16	133.390	265,79	9	R\$ 2.006,86	R\$ 205,65	0,0357	R\$ 10.807,60	R\$ 861,85
Turbo	1	21.466	126,85	9	R\$ 31.463,07	R\$ 205,65	0,4382	Ver tabela 10	Ver tabela 10
Virabrequim	1	125.450	1102,20	36	R\$ 90.000,00	R\$ 822,60	1,0000	R\$ 47.654,48	R\$ 1.603,70
Bloco	1	125.450	1102,20	36	R\$ 30.000,00	R\$ 822,60	1,0000	R\$ 47.654,48	R\$ 1.603,70
Eixo de comando	2	72.108	29,07	3	R\$ 977,20	R\$ 68,55	0,0526	R\$ 2.186,63	R\$ 293,69
Engrenagens	1	118.142	51,44	8	R\$ 3.055,44	R\$ 182,80	0,9231	R\$ 2.361,62	R\$ 1.571,91
Bomba de óleo	1	69.851	45,31	6	R\$ 4.590,00	R\$ 137,10	0,2632	R\$ 3.518,32	R\$ 757,95
Bomba d'água	1	69.851	39,66	6	R\$ 1.606,70	R\$ 137,10	0,1613	R\$ 3.079,60	R\$ 464,55
Bomba injetora	16	40.227	17,41	1	R\$ 117,65	R\$ 22,85	0,0435	R\$ 2.347,44	R\$ 3.479,12
Governador	1	23.775	26,01	3	R\$ 1.090,93	R\$ 68,55	0,1939	R\$ 5.933,81	R\$ 1.640,60
Outros	1	86.441	42,01	1,5	R\$ 4.581,21	R\$ 34,28	1,0000	R\$ 3.706,46	R\$ 2.327,41
Custo Estoque	0,004	-	-	-	R\$ 60.000,00	R\$ 269,06	-	-	-
Aumento produção	0,004	-	-	-	R\$ 269.400,00	R\$ 1.208,07	-	-	-
Peças sobressalentes	0,004	-	-	-	R\$ 1.257.932,39	R\$ 5.640,95	-	R\$ 676,91	-
Equipe revisão do MD	0,004	-	-	80	R\$ 9.140,00	R\$ 40,99	-	-	-
Treinamento equipe	0,004	-	-	-	R\$ 6.625,00	R\$ 29,71	-	-	-
Custo Oportunidade MD	0,009	-	-	-	R\$ 445.000,00	-	-	R\$ 478,92	-

Fonte: Autoria própria

Tabela 10 – Custos de oportunidade do conjunto de força (CF) e do turbo da alternativa 3.

Custo Oportunidade	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
CF – Locomotiva	R\$121.918	R\$255.294	R\$283.905	R\$247.903	R\$121.918	R\$255.294	R\$283.905	R\$247.903	R\$121.918	R\$255.294	R\$283.905	R\$247.903
CF – Trem	R\$ 9.557	R\$ 20.012	R\$ 22.255	R\$ 19.432	R\$ 9.557	R\$ 20.012	R\$ 22.255	R\$ 19.432	R\$ 9.557	R\$ 20.012	R\$ 22.255	R\$ 19.432
Turbo – Locomotiva	R\$ 29.468	R\$ 32.879										
Turbo – Trem	R\$ 3.663	R\$ 4.087										

Fonte: Autoria própria.

Como não devem ter mais conjuntos de força com idade superior a 4 anos e turbos com idade superior a 2 anos, a probabilidade condicional de falha segue como na Tabela 11:

Tabela 11 – Probabilidades condicionais dos conjuntos de força e turbo para a alternativa 3.

COMPONENTE	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO
CONJUNTO DE FORÇA	16	20,46%	48,60%	75,75%	90,34%
TURBO	1	37,52%	44,47%	37,52%	44,47%

Fonte: Autoria própria

Os custos associados à alternativa 3 estão presentes na Tabela 9, e os novos custos de oportunidade dos conjuntos de força e turbo estão na Tabela 10. Os detalhes da alternativa 3 como detalhamento ano a ano de todos os custos de orçamento e oportunidade ano a ano estão presentes no apêndice C.

Alternativa 4 – Manutenção preventiva com troca de componentes com melhor confiabilidade e estoque de sobressalentes.

Na alternativa 4 o princípio se mantém o mesmo que na alternativa 3, sendo a única e mais importante mudança a confiabilidade dos componentes que será utilizado. Usando como base os componentes novos presentes na ALL, conseguiu-se estimar a confiabilidade desses novos componentes que apresentam uma grande melhora em relação aos componentes antigos. O Quadro 2 representa as novas funções de confiabilidade dos componentes com seus parâmetros.

Componente	Distribuição	Parâmetros
Conjunto de Força	Weibull 2P	$\beta = 3,47$ e $\eta = 63.393$
Biela	Exponencial	$\lambda = 5,5E-06$
Turbo	Weibull 2P	$\beta = 4,4$ e $\eta = 27.959$
Virabrequim	Exponencial	$\lambda = 5,5E-06$
Bloco	Exponencial	$\lambda = 3,53E-06$
Eixo de Comando	Exponencial	$\lambda = 8,7E-06$
Engrenagens	Exponencial	$\lambda = 5,7E-06$
Bomba de Óleo	Exponencial	$\lambda = 1,4E-05$
Bomba d'Água	Exponencial	$\lambda = 1,4E-05$
Bomba Injetora	Exponencial	$\lambda = 2,45E-05$
Governador	Exponencial	$\lambda = 2,48E-05$

Quadro 2 - Novas funções de confiabilidade para os componentes para a alternativa 4
Fonte: Autoria própria utilizando software Reliasoft Weibull++

Assim a probabilidade de falha do conjunto de força e do turbo, seguindo as distribuições mostradas no Quadro 2 é mostrada na Tabela 12. Nota-se uma grande diferença entre as probabilidades da alternativa 4 em contraponto às probabilidades de falha nas alternativas anteriores e isso se deve ao uso de peças com melhor confiabilidade e em média 2 vezes mais caras.

Tabela 12 – Probabilidades condicionais dos conjuntos de força e turbo para a alternativa 4.

COMPONENTE	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO
CONJUNTO DE FORÇA	16	0,10%	1,03%	7,73%	13,86%	21,71%	30,91%
TURBO	1	0,60%	11,45%	46,94%	0,60%	11,45%	46,94%

Fonte: A autoria própria utilizando software Reliasoft Weibull++

Segundo o manual da GE das peças com melhor confiabilidade, mostrado no Quadro 3 o período de trocas preventivas é mais estendido em relação aos apresentados no Quadro 1.

Componente	Troca preventiva (anos)	Troca preventiva (horas)
Conjunto de Força	6	52.560
Turbo	3	26.280
Biela	6	52.560
Bomba de Óleo	6	52.560
Bomba d'água	6	52.560
Bomba injetora	3	26.280

Quadro 3 - Tempos de troca preventiva dos componentes do motor para a alternativa 4.
Fonte: A autoria própria a partir de (GE Transportation, 2008)

Assim como na alternativa 3, o uso de peças com menor desgaste proporciona uma economia de óleo lubrificante. Agora como as peças são de melhor qualidade, pois recebem uma recuperação geral e inclusive podem ser classificadas como “tão boas quanto novas” por atenderem as especificações de dimensões de peças novas, por isso custam quase três vezes mais. Esse menor desgaste proporciona um consumo baixo de óleo lubrificante equivalente a 1/3 da alternativa 1 e pouco mais da metade que na alternativa 3, sendo de 16.817 reais.

O fluxo de caixa de custos de manutenção preventiva acontece no 1º, 4º, 7º e 10º ano, o que dá 1/3 de paradas para manutenção preventiva a menos em relação à alternativa 3. Como mostrado na Figura 29, no primeiro ano acontece uma troca e revisão geral do motor diesel, enquanto no sétimo ano acontece uma revisão

parcial onde são trocados os componentes mostrados no Quadro 3 e revisados os outros pela equipe de revisão do motor diesel.

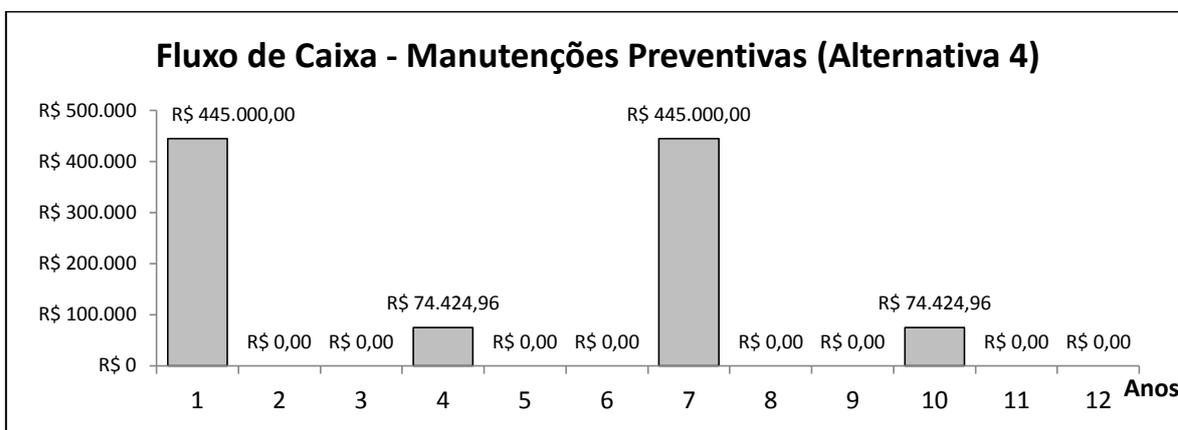


Figura 29 - Fluxo de caixa por ano das manutenções preventivas da alternativa 4.

Fonte: Autoria própria

Os outros custos são idênticos aos que já apareceram na alternativa 3, sem nenhum custo diferente, apenas com os valores de confiabilidade e custo diferentes. Esses custos estão presentes na Tabela 13, sendo os custos variáveis para os seis anos de vida útil do conjunto de força e três anos do turbo seguem na Tabela 14. O detalhamento dos custos está presentes no apêndice D.

Tabela 13 – Custos dos componentes do motor diesel da alternativa 4.

Componente	N	MTTF (horas)	MTTR (horas)	Horas efetivas em MC	Custo Peça	Custo Mão de Obra	Relação Impacto/Trocas	Lucro marginal locom. parada	Lucro marginal trem parado
Óleo combustível	1	-	-	-	R\$ 578.577,60	-	-	-	-
Óleo Lubrificante	1	-	-	-	R\$ 16.817,32	-	-	-	-
Conjunto de força	16	52.560	60,15	7	R\$ 14.500,00	R\$ 159,95	0,1716	Ver tabela 14	Ver tabela 14
Biela	16	181.332	265,79	9	R\$ 6.415,77	R\$ 205,65	0,0357	R\$ 7.950,20	R\$ 633,99
Turbo	1	40.172	126,85	9	R\$ 42.500,00	R\$ 205,65	0,4382	Ver tabela 14	Ver tabela 14
Virabrequim	1	181.332	1102,20	36	R\$ 160.000,00	R\$ 822,60	1,0000	R\$ 32.968,56	R\$ 1.109,48
Bloco	1	282.948	1102,20	36	R\$ 30.000,00	R\$ 822,60	1,0000	R\$ 21.128,46	R\$ 711,03
Eixo de comando	2	114.822	29,07	3	R\$ 977,20	R\$ 68,55	0,0526	R\$ 1.373,20	R\$ 184,44
Engrenagens	1	175.200	51,44	8	R\$ 3.055,44	R\$ 182,80	0,9231	R\$ 1.592,51	R\$ 1.059,98
Bomba de óleo	1	69.851	45,31	6	R\$ 4.590,00	R\$ 137,10	0,2632	R\$ 3.518,32	R\$ 757,95
Bomba d'água	1	69.851	39,66	6	R\$ 1.606,70	R\$ 137,10	0,1613	R\$ 3.079,60	R\$ 464,55
Bomba injetora	16	40.227	17,41	1	R\$ 1995,31	R\$ 22,85	0,0435	R\$ 2.347,44	R\$ 3.479,12
Governador	1	40.175	26,01	3	R\$ 7.000,00	R\$ 68,55	0,1939	R\$ 3.511,81	R\$ 970,95
Outros	1	105.000	42,01	1,5	R\$ 4.581,21	R\$ 34,28	1,0000	R\$ 2.255,32	R\$ 1.916,04
Custo Estoque	0,004	-	-	-	R\$ 60.000,00	R\$ 269,06	-	-	-
Aumento produção	0,004	-	-	-	R\$ 269.400,00	R\$ 1.208,07	-	-	-
Peças sobressalentes	0,004	-	-	-	R\$ 2.318.361,70	R\$ 10.396,24	-	R\$ 1.247,55	-
Equipe revisão do MD	0,004	-	-	80	R\$ 9.140,00	R\$ 40,99	-	-	-
Treinamento equipe	0,004	-	-	-	R\$ 6.625,00	R\$ 29,71	-	-	-
Custo Oportunidade MD	0,009	-	-	-	R\$ 445.000,00	-	-	R\$ 478,92	-

Fonte: Autoria própria

Tabela 14 – Custos de oportunidade do conjunto de força (CF) e do turbo da alternativa 4.

Custo Oportunidade	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
CF – Locomotiva	R\$ 609	R\$ 6.194	R\$ 45.531	R\$ 75.501	R\$102.755	R\$118.601	R\$ 609,48	R\$ 6.194	R\$ 45.531	R\$ 75.501	R\$102.755	R\$118.601
CF – Trem	R\$ 63	R\$ 631	R\$ 4.672	R\$ 7.748	R\$ 10.554	R\$ 12.171	R\$ 63	R\$ 631	R\$ 4.672	R\$ 7.748	R\$ 10.554	R\$ 12.171
Turbo – Locomotiva	R\$ 472	R\$ 8.941	R\$ 32.557	R\$ 472	R\$ 8.941	R\$ 32.557	R\$ 472	R\$ 8.941	R\$ 32.557	R\$ 472	R\$ 8.941	R\$ 32.557
Turbo – Trem	R\$ 59	R\$ 1.111	R\$ 4.046	R\$ 59	R\$ 1.111	R\$ 4.046	R\$ 59	R\$ 1.111	R\$ 4.046	R\$ 59	R\$ 1.111	R\$ 4.046

Fonte: Autoria própria.

Alternativa 5 – Troca por um motor diesel com injeção eletrônica, realiza manutenção preventiva com troca de componentes com melhor confiabilidade e estoque de sobressalentes.

A alternativa 5 tem duas diferenças em relação a alternativa 4. O primeiro é o fato do turbo ter um período de troca preventiva ser duas vezes maior, 6 anos. O segundo é o custo do motor diesel utilizado, com injeção eletrônica e controle eletrônico de rotação e custam 1,75 milhões de reais. O preço que é quatro vezes superior ao motor da alternativa 4 se deve a usar apenas peças novas e importadas, que incidem impostos, frete marítimo, além da influência cambial do dólar.

O fluxo de caixa de manutenção preventiva da alternativa 5 está presente na Figura 30, sendo que há uma revisão parcial no início do 7º ano quando o motor diesel chega à metade do seu ciclo de vida de 12 anos.

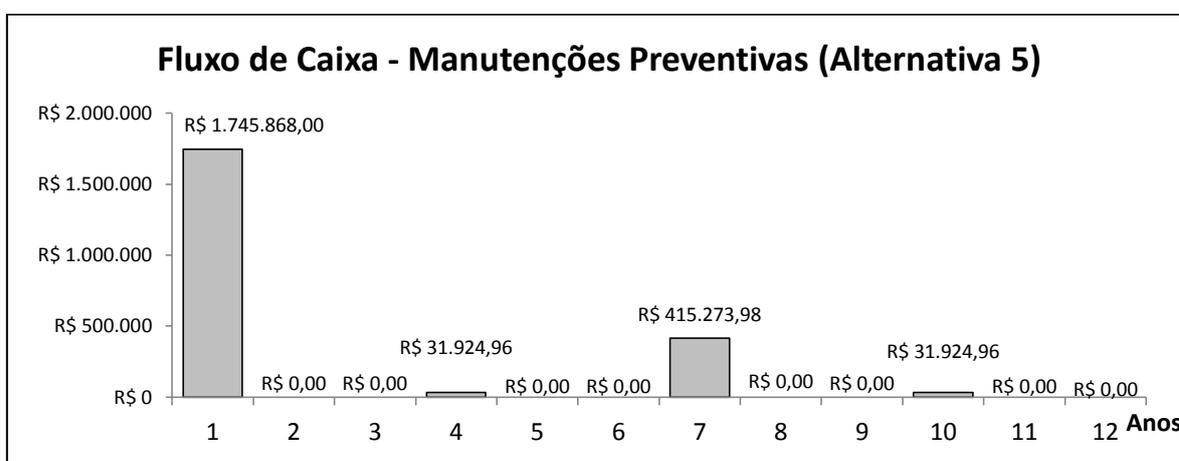


Figura 30 - Fluxo de caixa por ano das manutenções preventivas da alternativa 5.
Fonte: Autoria própria

Os custos de óleo lubrificante ficam ainda menores do que na alternativa 4, sendo apenas 1/3 dos custos da alternativa anterior e apenas 12% do consumo estimado da alternativa 1. Como são peças novas o desgaste é inexistente e só após a primeira recuperação o índice se eleva ao nível da alternativa 4. A injeção eletrônica proporciona uma pequena economia do consumo de combustível, estimado na ordem de 5% por fazer um controle melhor da quantidade de combustível que é injetada nos cilindros.

Tabela 15 – Custos dos componentes do motor diesel da alternativa 5.

Componente	N	MTTF (horas)	MTTR (horas)	Horas efetivas em MC	Custo Peça	Custo Mão de Obra	Relação Impacto/Trocas	Lucro marginal locom. parada	Lucro marginal trem parado
Óleo combustível	1	-	-	-	R\$ 549.648,72	-	-	-	-
Óleo Lubrificante	1	-	-	-	R\$ 5.605,77	-	-	-	-
Conjunto de força	16	52.560	60,15	7	R\$ 14.500,00	R\$ 159,95	0,1716	Ver tabela 16	Ver tabela 16
Biela	16	181.332	265,79	9	R\$ 6.415,77	R\$ 205,65	0,0357	R\$ 7.950,20	R\$ 633,99
Turbo	1	40.172	126,85	9	R\$ 42.500,00	R\$ 205,65	0,4382	Ver tabela 16	Ver tabela 16
Virabrequim	1	181.332	1102,20	36	R\$ 160.000,00	R\$ 822,60	1,0000	R\$ 32.968,56	R\$ 1.109,48
Bloco	1	282.948	1102,20	36	R\$ 30.000,00	R\$ 822,60	1,0000	R\$ 21.128,46	R\$ 711,03
Eixo de comando	2	114.822	29,07	3	R\$ 977,20	R\$ 68,55	0,0526	R\$ 1.373,20	R\$ 184,44
Engrenagens	1	175.200	51,44	8	R\$ 3.055,44	R\$ 182,80	0,9231	R\$ 1.592,51	R\$ 1.059,98
Bomba de óleo	1	69.851	45,31	6	R\$ 4.590,00	R\$ 137,10	0,2632	R\$ 3.518,32	R\$ 757,95
Bomba d'água	1	69.851	39,66	6	R\$ 1.606,70	R\$ 137,10	0,1613	R\$ 3.079,60	R\$ 464,55
Bomba injetora	16	40.227	17,41	1	R\$ 1995,31	R\$ 22,85	0,0435	R\$ 2.347,44	R\$ 3.479,12
Governador	1	40.175	26,01	3	R\$ 7.000,00	R\$ 68,55	0,1939	R\$ 3.511,81	R\$ 970,95
Outros	1	105.000	42,01	1,5	R\$ 4.581,21	R\$ 34,28	1,0000	R\$ 2.255,32	R\$ 1.916,04
Custo Estoque	0,004	-	-	-	R\$ 60.000,00	R\$ 269,06	-	-	-
Aumento produção	0,004	-	-	-	R\$ 269.400,00	R\$ 1.208,07	-	-	-
Peças sobressalentes	0,004	-	-	-	R\$ 2.318.361,70	R\$ 10.396,24	-	R\$ 1.247,55	-
Equipe revisão do MD	0,004	-	-	80	R\$ 9.140,00	R\$ 40,99	-	-	-
Treinamento equipe	0,004	-	-	-	R\$ 6.625,00	R\$ 29,71	-	-	-
Custo Oportunidade MD	0,009	-	-	-	R\$ 1.745.868,00	-	-	R\$ 1.878,92	-

Fonte: Autoria própria

Tabela 16 – Custos de oportunidade do conjunto de força (CF) e do turbo da alternativa 5.

Custo Oportunidade	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
CF – Locomotiva	R\$ 609	R\$ 6.194	R\$ 45.531	R\$ 75.501	R\$102.755	R\$118.601	R\$ 609,48	R\$ 6.194	R\$ 45.531	R\$ 75.501	R\$102.755	R\$118.601
CF – Trem	R\$ 63	R\$ 631	R\$ 4.672	R\$ 7.748	R\$ 10.554	R\$ 12.171	R\$ 63	R\$ 631	R\$ 4.672	R\$ 7.748	R\$ 10.554	R\$ 12.171
Turbo – Locomotiva	R\$ 1299	R\$ 4.720	R\$ 8.715	R\$ 13.127	R\$ 17.988	R\$ 23.095	R\$ 1299	R\$ 4.720	R\$ 8.715	R\$ 13.127	R\$ 17.988	R\$ 23.095
Turbo – Trem	R\$ 161	R\$ 586	R\$ 1.083	R\$ 1.631	R\$ 2.235	R\$ 2.870	R\$ 161	R\$ 586	R\$ 1.083	R\$ 1.631	R\$ 2.235	R\$ 2.870

Fonte: Autoria própria.

O turbo utilizado por este motor é diferente dos antes utilizados e tem uma vida útil dada pelo fabricante de 6 anos. Por uma análise dos dados de vida, chegou-se a distribuição de Weibull com parâmetros $\beta = 2,9$ e $\eta = 56.107$. As probabilidades condicionais dos seis anos de operação estão no Quadro 4.

COMPONENTE	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO
TURBO	1	1,65%	5,98%	10,90%	16,01%	21,15%	25,89%

Quadro 4 - Probabilidade de falha do turbo com vida útil de 6 anos.

Fonte: Autoria própria utilizando Reliasoft Weibull++.

Os custos associados à alternativa 5 estão presentes na Tabela 15, e os novos custos de oportunidade dos conjuntos de força e turbo estão na Tabela 16. Os detalhes da alternativa 5 estão presentes no apêndice E.

Os custos de orçamento podem ser divididos em custo de manutenção corretiva, custo de manutenção preventiva e custo de energia – que englobam os custos de óleo combustível e óleo lubrificante. Os custos de oportunidade são divididos em custos de oportunidade por locomotiva parada e custos de oportunidade por trem parado. Esses custos estão resumidos na Tabela 17.

4.6 ETAPA 6: FAÇA OS CUSTOS ESTIMADOS PARA CADA ANO

Para fazer os custos estimados para cada ano, deve-se trazer todos para o valor presente líquido (VPL). A primeira regra sobre a matemática financeira é de que o dinheiro varia no tempo. (ABREU, 2011) O mesmo valor hoje valerá mais amanhã, pois se tem aplicado a ele uma política de juros e inflação.

$$VF = VP * (1 + j)^n$$

Equação 6 - Fórmula do valor futuro para juros compostos.

Fonte: (ABREU, 2011)

O valor futuro (VF) é equivalente ao valor presente (VP) multiplicado pelos juros j aplicado elevado ao número de meses n . Ao trazer todos os custos para o valor presente podemos comparar corretamente se é melhor ter esse custo num tempo (t) ou em um tempo (t+n).

Tabela 17 – Resumo dos valores de cada alternativa.

Alternativas	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Energia	30.779	44.890	47.896	44.222	45.054	45.503	45.144	45.200	45.251	45.219	45.221	45.227
Peças M. Corretiva	39.382	60.697	65.203	59.886	61.110	61.767	61.244	61.326	61.401	61.353	61.357	61.365
Peças M. Preventiva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oportunidade Locomotiva	370.969	564.515	605.705	555.628	567.000	573.128	568.226	568.989	569.695	569.247	569.284	569.362
Oportunidade Trem	30.779	44.890	47.896	44.222	45.054	45.503	45.144	45.200	45.251	45.219	45.221	45.227
Total Alternativa 1	471.908	714.991	766.700	703.958	718.218	725.901	719.758	720.714	721.599	721.038	721.084	721.182
Energia	627.301	627.301	627.301	627.301	627.301	627.301	627.301	627.301	627.301	627.301	627.301	627.301
Peças M. Corretiva	46.500	67.815	72.321	67.004	68.228	68.885	68.362	68.444	68.519	68.471	68.475	68.483
Peças M. Preventiva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oportunidade Locomotiva	280.256	417.042	446.220	410.381	418.483	422.854	419.351	419.896	420.400	420.080	420.107	420.157
Oportunidade Trem	30.779	44.890	47.896	44.222	45.054	45.503	45.144	45.200	45.251	45.219	45.221	45.227
Total Alternativa 2	984.835	1.157.047	1.193.737	1.148.908	1.159.065	1.164.542	1.160.158	1.160.840	1.161.471	1.161.070	1.161.104	1.161.167
Energia	606.606	606.606	606.606	606.606	606.606	606.606	606.606	606.606	606.606	606.606	606.606	606.606
Peças M. Corretiva	46.708	68.023	70.925	66.918	46.708	68.023	70.925	66.918	46.708	68.023	70.925	66.918
Peças M. Preventiva	158.178	0	33.345	0	158.178	0	33.345	0	158.178	0	33.345	0
Oportunidade Locomotiva	280.827	417.613	442.814	410.222	280.827	417.613	442.814	410.222	280.827	417.613	442.814	410.222
Oportunidade Trem	27.824	38.703	40.522	38.124	27.824	38.703	40.522	38.124	27.824	38.703	40.522	38.124
Total Alternativa 3	1.120.144	1.130.945	1.194.213	1.121.870	1.120.144	1.130.945	1.194.213	1.121.870	1.120.144	1.130.945	1.194.213	1.121.870
Energia	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395
Peças M. Corretiva	28.259	35.045	63.388	57.739	73.072	92.150	28.259	35.045	63.388	57.588	70.225	81.770
Peças M. Preventiva	445.000	0	0	74.425	0	0	415.274	0	0	74.425	0	0
Oportunidade Locomotiva	82.533	96.544	159.541	157.425	193.149	232.611	82.533	96.544	159.541	157.149	187.913	213.510
Oportunidade Trem	11.409	13.030	20.007	19.094	22.944	27.505	11.409	13.030	20.007	19.060	22.293	25.132
Total Alternativa 4	1.162.596	740.014	838.330	904.078	884.560	947.661	1.132.870	740.014	838.330	903.617	875.826	915.807
Energia	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254
Peças M. Corretiva	27.103	31.144	48.818	63.014	76.385	85.400	27.103	31.102	48.467	55.949	66.863	73.277
Peças M. Preventiva	1.745.868	0	0	31.925	0	0	415.274	0	0	31.925	0	0
Oportunidade Locomotiva	76.241	85.202	128.579	162.961	195.076	216.029	76.241	85.124	135.599	157.633	185.230	201.389
Oportunidade Trem	10.246	11.240	15.778	19.402	22.803	25.064	10.246	11.230	15.698	17.787	20.626	22.292
Total Alternativa 5	2.414.713	682.841	748.430	832.556	849.518	881.747	1.084.119	682.711	755.018	818.548	827.974	852.213

Fonte: Autoria própria.

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Há também a depreciação sobre as peças instaladas, que devem ser contabilizadas para o pagamento de menos imposto de renda (IRPJ) e contribuição social do lucro líquido (CSLL), que para o Brasil é de 34%. (Pricewaterhouse Coopers Inc., 2011) Foi definido que as peças usarão a depreciação linear e não terão valores residuais ao final. Por exemplo, um conjunto de força que tem vida útil de 4 anos e custa 14.500 reais, depreciará 3.625 reais a cada ano, e esse valor é descontado contabilmente do lucro líquido presumido e o imposto incidente também é menor.

Tabela 18 – Soma do valor presente líquido de todas as alternativas dos custos do motor diesel em 12 anos.

ALTERNATIVAS	SOMA DO VPL (12 ANOS)
ALTERNATIVA 1	R\$ -6.349.899,19
ALTERNATIVA 2	R\$ -5.676.460,39
ALTERNATIVA 3	R\$ -5.477.700,30
ALTERNATIVA 4	R\$ -4.570.590,42
ALTERNATIVA 5	R\$ -5.215.564,47

Fonte: Autoria própria.

O demonstrativo detalhado contábil de cada alternativa está presente no apêndice VI e a soma do valor presente líquido, utilizando uma taxa de desconto de 8% ao ano, está indicada na Tabela 18.

4.7 ETAPA 7: ENCONTRE O PONTO DE EQUILÍBRIO DAS ALTERNATIVAS

De acordo com os valores ano a ano já descontados, presentes no apêndice E, pode-se construir o gráfico com os VPLs acumulados para verificar-se como os custos variam em cada ano e quando uma alternativa passa a ser mais viável que a outra.

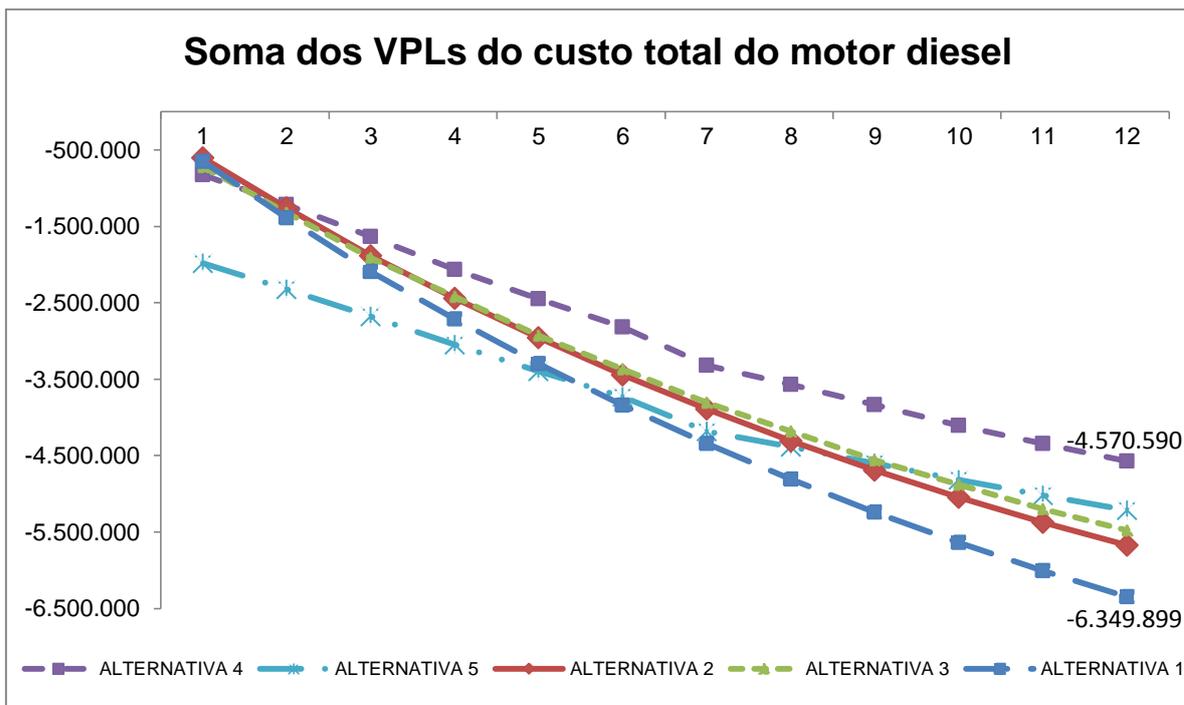


Figura 31 - Soma dos VPLs acumulados do custo total do motor diesel.
Fonte: Autoria própria. Valores em reais.

O interessante ao olhar para o gráfico da Figura 31 é buscar uma alternativa que dê um retorno grande e rápido. A alternativa que mais se adequar a essa premissa é a melhor em base de comparação. Nos primeiros dois anos, o custo para as quatro primeiras alternativas é semelhante e só se diferencia a partir do terceiro ano, quando a alternativa 4 que contempla o uso da política de manutenção preventiva com peças com boa confiabilidade se sobressai. A estratégia atual de manutenção do motor diesel aparece ao longo do ciclo de vida de 12 anos como a pior alternativa, sendo até 39% mais cara.

4.8 ETAPA 8: CONSTRUA O GRÁFICO DE PARETO PARA DESCOBRIR QUEM CONTRIBUI MAIS NO CUSTO

O propósito de associar uma análise de Pareto ao LCC é de descobrir quais são os poucos custos que contribuem mais para os grandes custos do ciclo de vida do motor diesel e possa ser feita uma análise precisa de onde cada alternativa leva vantagem em relação a outra.

Os custos médios da alternativa 1 são mostrados na Figura 32. Pode-se deduzir a partir dele que os maiores custos ficam com os custos de energia, e será assim para todas as alternativas. No entanto, o custo de oportunidade por locomotiva parada é quase tão grande quanto esse custo de energia.

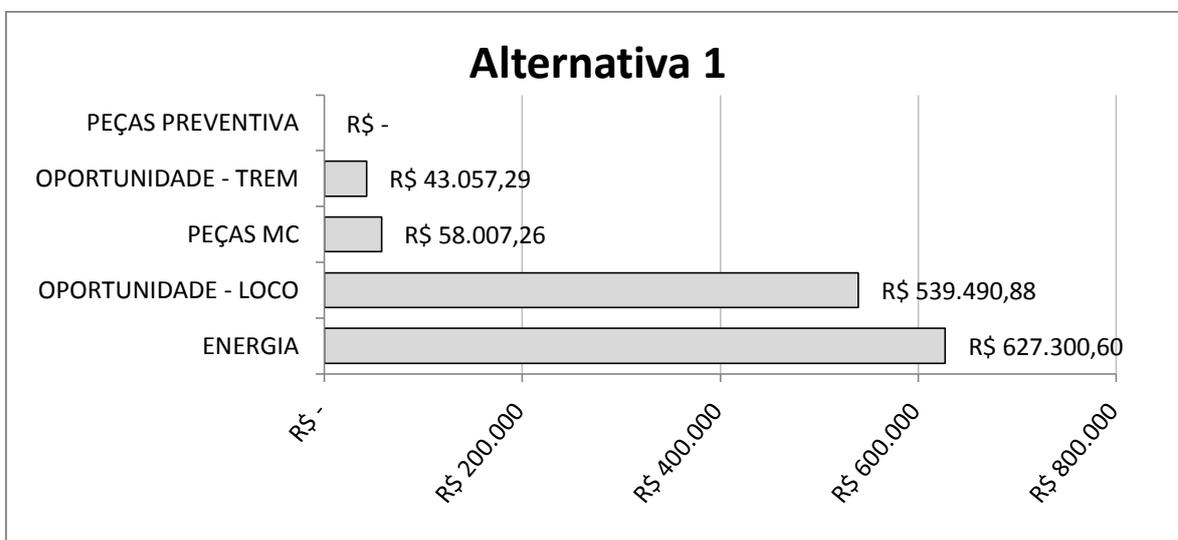


Figura 32 - Gráfico de Pareto dos custos médios da alternativa 1
Figura: Autoria própria.

Os custos médios da alternativa 2, presente na Figura 33 indicam que o aumento do custo das peças de manutenção corretiva (Peças MC) refletem já uma diminuição nos custos de oportunidade por locomotiva parada.

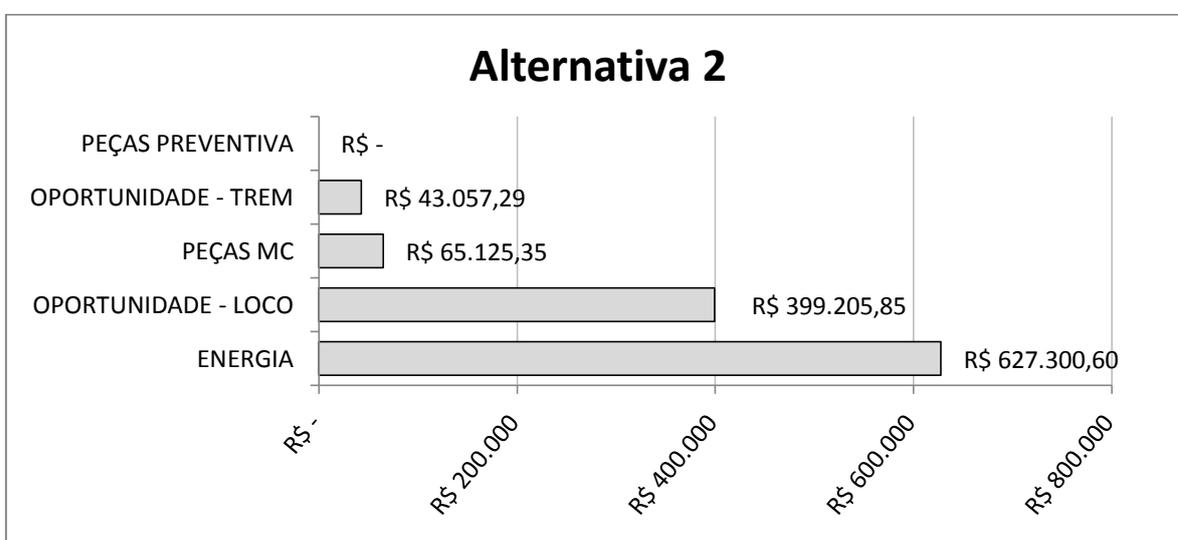


Figura 33 - Gráfico de Pareto dos custos médios da alternativa 2.
Fonte: Autoria própria.

Para a alternativa 3, mostrado na Figura 34, os custos associados tem um aumento em apenas um quesito, o de manutenção preventiva. Os outros custos sofrem pequenas diminuições que na soma dos valores o faz ficar muito próximo com a alternativa 2 no custo total, como visto na Figura 31.

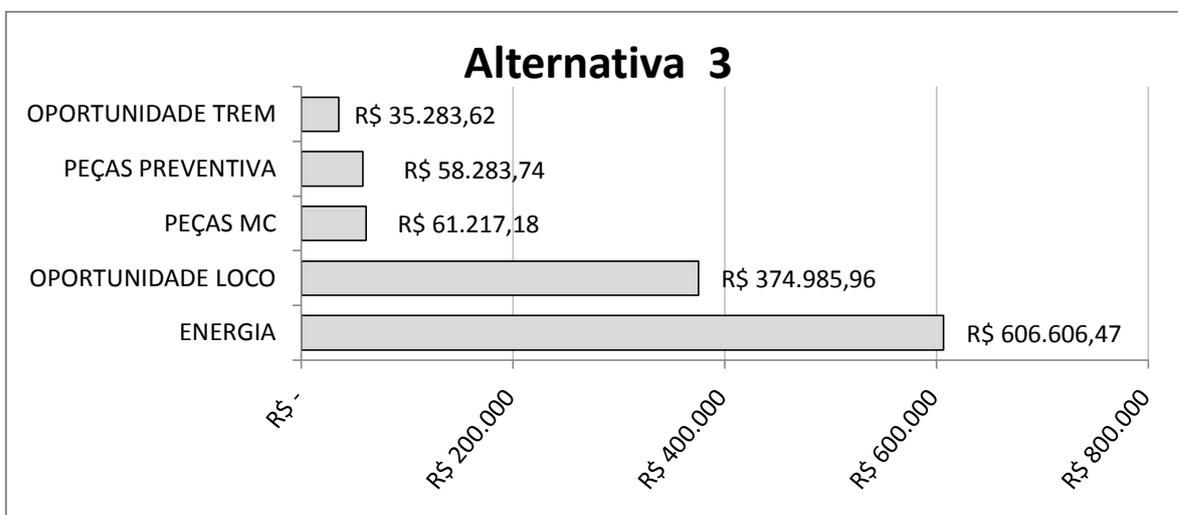


Figura 34 - Gráfico de Pareto dos custos médios da alternativa 3.
Fonte: Autoria própria.

No gráfico de Pareto da alternativa 4, na Figura 35, apenas o custo de energia mantém-se alto, o que é o normal. Os custos de manutenção corretiva e oportunidade caem principalmente o custo de oportunidade por locomotiva parada que cai pela metade, causado por um incremento no custo de manutenção preventiva ao usar peças de melhor confiabilidade e mais caras.

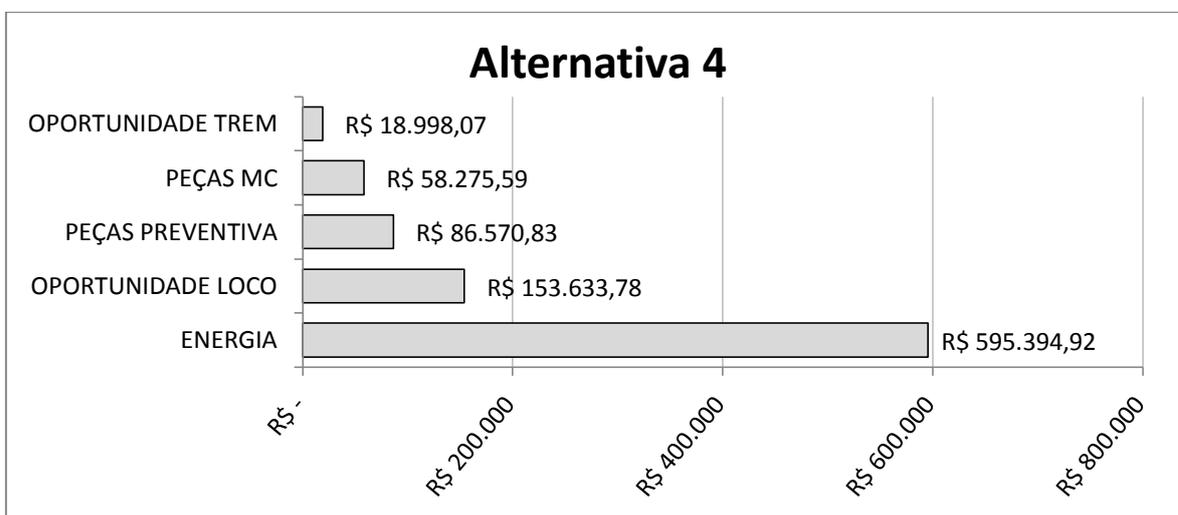


Figura 35 - Gráfico de Pareto dos custos médios da alternativa 4.
Fonte: Autoria própria

Os custos médios na alternativa 5, presentes na , mostram um grande aumento nos custos de manutenção preventiva que não reflete uma diminuição na mesma escala nos outros custos.

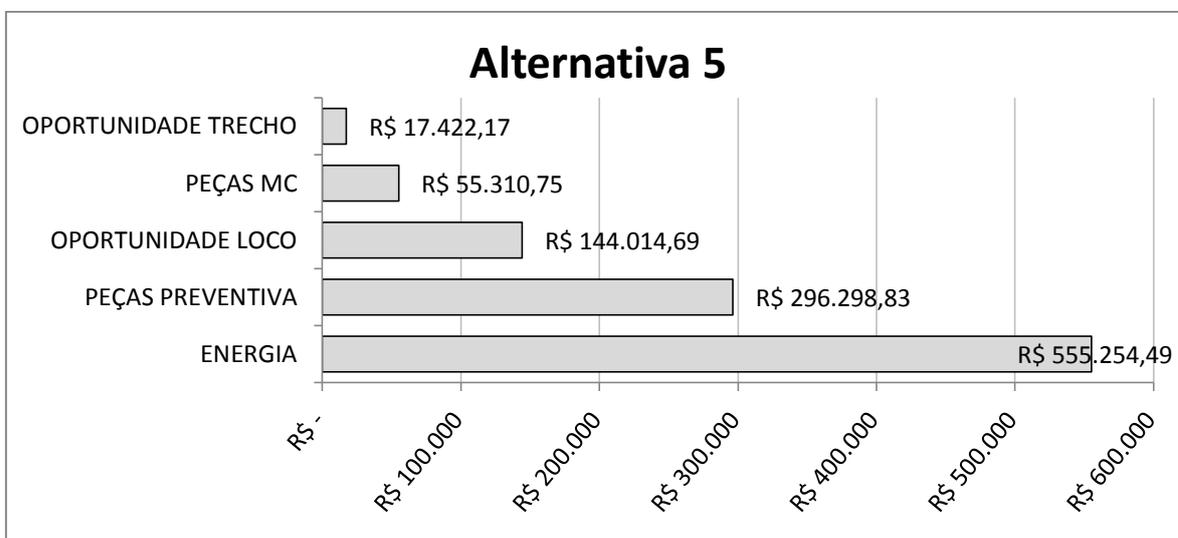


Figura 36 - Gráfico de Pareto dos custos médios da alternativa 5.

Fonte: Autoria própria

A partir desses gráficos pode-se ver que os custos que mais variam entre as alternativas é o do custo de oportunidade de locomotiva e custo de manutenção preventiva, enquanto os custos de manutenção corretiva só crescem e de oportunidade do trem parado caem, o que este último demonstra um aumento de eficiência operacional. Os custos de energia embora continuem altos caem R\$ 60 mil na alternativa 5 em relação a alternativa 1, o que é equivalente ao custo de manutenção corretiva da mesma alternativa.

4.9 ETAPA 9: ANÁLISE DOS ALTOS CUSTOS E SUAS RAZÕES

Claramente observando os gráficos de Pareto e o Quadro 4 com os resumos dos custos pode-se observar que comparando com a alternativa 1, a estratégia atual, quando há a entrada de uma estratégia com estoque a partir da alternativa 2 já reduz o tempo médio para reparo (MTTR) e portanto diminui os custos de oportunidade por locomotiva parada. Quando a estratégia de realizar uma

manutenção preventiva de alguns componentes, a partir da alternativa 3, o custo de manutenção preventiva obviamente sai do zero e aumenta. E enquanto há uma diminuição no custo de oportunidade da locomotiva parada e dos custos de consumo de óleo lubrificante, ele é pequeno em virtude do aumento do custo direto no orçamento por custas da manutenção preventiva. Isso nos diz que embora (BLISCHKE, et al., 2000) diga que o uso de uma política de manutenção preventiva seja o mais recomendável para equipamentos que sofram desgaste, se a peça não for retirada no momento correto o gasto só vai ser antecipado e a melhora na confiabilidade na operação do componente não vai ser percebido.

É necessário salientar que para uma empresa, um dos indicadores mais importantes para a saúde financeira e longevidade da empresa é manter seu fluxo de caixa sempre positivo, e para fazer isso é necessário buscar sempre um baixo custo operacional. Ou seja, essa mudança operacional que a mudança na estratégia de manutenção do motor diesel tem que ser percebido no resultado operacional da produção, quando da apuração do demonstrativo de resultados (DRE).

A partir da alternativa 4, já são três as mudanças em relação à estratégia atual, aumento de estoque, manutenção preventiva de componentes e melhoria da confiabilidade dos componentes. E aqui é onde os resultados realmente aparecem, com uma variação de R\$ 80 mil em custo médio de manutenção preventiva, o custo de oportunidade por locomotiva parada diminui em R\$ 400 mil. E uma redução em R\$ 24 mil no custo de oportunidade pelo trem parado. Esses dois valores juntos mostram que um aumento no investimento em manutenção com confiabilidade dá em retorno muito mais tempo de locomotiva disponível para realizar transporte e, portanto trazer retorno financeiro à empresa.

Ao então manter-se essas três estratégias, mas partir para uma modernização do motor diesel, utilizando um motor com tecnologia atual em comparação a original, verifica-se que ela é muito cara. Essa nova tecnologia custa quase 4 vezes mais e o retorno embora venha demora muito tempo e ainda sim é mais cara do que a alternativa 4. Isso nos diz que embora aplicar novas estratégias de manutenção como melhoria da confiabilidade e melhoria no tempo de parada da manutenção, elas devem ser equilibradas conforme a demanda da produção porque senão os custos de manutenção ultrapassam o limite que pode ser retornado via aumento de produção.

4.10 ETAPA 10: ESTUDE OS RISCOS DOS ITENS MAIS CAROS E SUAS OCORRÊNCIAS

Os itens mais caros que afetam a operação atual do motor diesel é a falta de três estratégias: estoque de peças sobressalentes, política de manutenção preventiva e uso de componentes com melhor confiabilidade.

A falta do estoque pode ser exemplificada pela diferença entre o tempo médio entre reparos (MTTR) dos componentes entre as alternativas 2 e 1, e a diferença financeira que isso traz presente na Tabela 19.

Tabela 19 – Comparação financeira dos componentes pelo tempo médio entre reparos (MTTR).

COMPONENTES	MTTR (ALT. 1) Em horas	MTTR (ALT. 2) Em horas	DIFERENÇA FINANCEIRA EM 12 ANOS
Conjunto de Força	84,21	60,15	R\$ 731.012
Biela	372,10	265,79	R\$ 32.577
Turbo	253,70	126,85	R\$ 248.961
Eixo de Comando	40,70	29,07	R\$ 6.592
Engrenagens	72,02	51,44	R\$ 7.120
Bomba de Óleo	63,43	45,31	R\$ 10.603
Bomba d'Água	55,42	39,66	R\$ 9.280
Bomba Injetora	24,37	17,41	R\$ 7.072
Governador	36,42	26,01	R\$ 17.897
Total	-	-	R\$ 1.071.116

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores presentes líquidos com taxa de desconto de 12 reais.

O custo para atingir esse ganho no custo de oportunidade por motor diesel em todo o ciclo de 12 anos é de apenas R\$ 53.642 por motor diesel em todo o ciclo. Mas ao utilizar apenas peças de baixa confiabilidade o risco da adoção dessa nova estratégia é moderado, pois se a taxa de falhas for superior ao estimado esse ganho será bem menor. No entanto, o uso de componentes com melhor confiabilidade aliado ao uso de uma política de trocas preventivas pode amplificar esses ganhos como verificados na alternativa 4.

A diferença entre as confiabilidades dos componentes das alternativas 4 e das alternativas 1, 2 e 3 e apresentada na Tabela 20, pelo tempo médio entre falhas (MTTF) dos componentes calculados pelo programa Reliasoft Weibull++. A diferença entre os custos de oportunidade perdida por locomotiva parada e por trem parado entre as alternativas 2 e 4, onde ambos já contemplam o estoque de peças sobressalentes.

Tabela 20 – Comparação financeira entre os componentes pelos seus tempos médio entre falhas (MTTF) e custo singular de cada peça.

COMPONENTES	MTTF (ALT. 1) Em horas	CUSTO PEÇA ALT. 1	MTTF (ALT. 4) Em horas	CUSTO PEÇA ALT.4	DIFERENÇA FINANCEIRA EM 12 ANOS
Conjunto de Força	27.203	R\$ 5.407,91	52.560	R\$ 14.500,00	R\$ 1.579.827
Biela	133.390	R\$ 2.006,86	181.332	R\$ 6.415,77	R\$ 23.250
Turbo	21.466	R\$ 31.463,07	40.172	R\$ 42.500,00	R\$ 179.471
Virabrequim	125.450	R\$ 90.000,00	181.332	R\$160.000,00	R\$ 114.398
Bloco	125.450	R\$ 30.000,00	282.948	R\$ 30.000,00	R\$ 206.629
Eixo de Comando	72.108	R\$ 977,20	114.822	R\$ 977,20	R\$ 6.953
Engrenagens	118.142	R\$ 3.055,44	175.200	R\$ 3.055,44	R\$ 9.654
Bomba de Óleo	69.851	R\$ 4.590,00	69.851	R\$ 4.590,00	R\$ 0
Bomba d'Água	69.851	R\$ 1.606,70	69.851	R\$ 1.606,70	R\$ 0
Bomba Injetora	40.227	R\$ 117,65	40.227	R\$ 1.995,31	R\$ 0
Governador	23.775	R\$ 1.090,93	40.172	R\$ 7.000,00	R\$ 23.298
Total	-	-	-	-	R\$ 2.143.484

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores presentes líquidos com taxa de desconto de 12 reais.

Essa diminuição expressiva no custo de oportunidade por locomotiva e por trem parado depende do uso de peças com melhores confiabilidades, e que custam mais. Em todo o ciclo esse custo a mais é de R\$ 743.523 – já trazidos para o valor presente líquido – ou seja, menos de um terço do ganho no custo de oportunidade. O risco em aplicar essa estratégia reside em que há uma transferência nas classes de custo, ou seja, em 12 anos os custos diretos aumentarão e diminuirão os custos de oportunidade, e isso depende da capacidade da empresa em adquirir fluxo de caixa para investir na correta manutenção do motor diesel e também na capacidade da empresa em adquirir parcela de mercado para aproveitar a melhor disponibilidade operacional e produzir mais.

4.11 ETAPA 11: SELECIONE A MELHOR ALTERNATIVA COM BASE NO LCC

Com base em todas as etapas anteriores, podemos concluir que a alternativa 4, que contempla o uso de três estratégias para a menor custo e melhor operação do motor diesel: estoque de peças sobressalentes, peças com maior confiabilidade e política de manutenção preventiva. O custo total do ciclo de vida do motor diesel usando essa alternativa e trazido ao valor presente é 1,8 milhões de reais mais barato do que a estratégia atual.

5 CONCLUSÃO

A adoção de uma política de manutenção preventiva de motores diesel ferroviário é mais vantajosa do que a estratégia atual de apenas realizar manutenções corretivas quando o motor vier a falhar. Essa política aliada ao uso de peças com maior confiabilidade, mesmo que mais caras e um estoque de peças sobressalentes se mostrou 28% mais barata do que a estratégia atual. A diminuição do tempo de reparo do motor diesel e aumento do tempo médio entre falhas provocarão a diminuição das paradas operacionais e com a locomotiva operando mais tempo em condições normais, aumenta-se também a produtividade do transporte ferroviário.

Na melhor estratégia de manutenção, o custo total é menor, mas o custo direto que se reflete no orçamento de manutenção é amplamente (160%) maior, o que indica que um investimento no tamanho correto trará um bom retorno financeiro em maior tempo de produção ao longo do ciclo de vida. Há de se ter cuidado, no entanto, ao equilibrar corretamente a confiabilidade e o custo da peça, pois se a peça for muito mais cara, mesmo que haja um ganho de produtividade ele não vai cobrir os custos maiores e a estratégia não é a mais eficaz.

O estudo do custo ciclo de vida é uma ferramenta importante para descobrir qual manutenção é a mais barata levando em conta todas as variáveis que controlam a operação do motor diesel, pois mesmo se uma estratégia pareça mais barata no orçamento direto do setor de manutenção a não produtividade do ativo faz com que se deixe de ganhar todo o rendimento que ele poderia estar dando de retorno à companhia.

TRABALHOS FUTUROS

Com toda a estrutura do estudo do custo do ciclo de vida do motor diesel estabelecido, outros componentes importantes de locomotivas podem ser estudados para saber se tem sua estratégia de manutenção atual como a mais correta entre as alternativas disponíveis. Esses componentes podem ser o motor elétrico de tração, o alternador e o compressor. São peças que, assim como o motor diesel, são caras, com um número de falhas elevado e alto tempo de reparo.

Por outro lado, o estudo pode ser usado na locomotiva toda, quando da aquisição de novas locomotivas, em um processo de concorrência, os custos de operação e manutenção de uma das locomotivas podem ser mais alto que outro, escondendo o preço de aquisição do ativo. Esse tipo de estudo será tomado como padrão na companhia quando da avaliação técnica dos concorrentes.

REFERÊNCIAS

ABREU, José C. **Matemática Financeira**. Rio de Janeiro : Fundação Getúlio Vargas, 2011.

AMÉRICA LATINA LOGÍSTICA. **Manual Técnico de Locomotivas 112.23 - Substituição de cilindro do motor diesel GE 7FDL**. Curitiba: UNIALL - Universidade Corporativa América Latina Logística, 2011.

AMÉRICA LATINA LOGÍSTICA. **VG_CX001 – Pintura de vagões**. Curitiba: ALL, 2011.

ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Evolução do Transporte Ferroviário**. Brasília: ANTT, 2010.

AUSTRALIAN NATIONAL AUDIT OFFICE. **Life cycle costing – Better practice guide**. Canberra, Austrália: The Publications Manager – Australian National Audit Office, 2011.

BARRINGER, H. Paul. **A Life Cycle Cost Summary**. Perth, Austrália: Maintenance Engineering Society of Australia, 2003.

BARRINGER, H.Paul; WEBER, David P. **Life cycle cost tutorial**. Houston, Estados Unidos: Gulf Publishing Company, 1996.

BLISCHKE, W. R., e D.N. P. MURTHY. **Reliability: Modeling, prediction and optimization**. Nova Iorque, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 2000.

BORBA, José L. **Estrutura das locomotivas diesel-elétricas – Motor diesel ferroviário**. Curitiba: UNIALL – Universidade Corporativa América Latina Logística, 2009. – Vol. III.

BORBA, José L. **Material de Tração**. Belo Horizonte: IEC – Instituto de Educação Continuada – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2007.

CAVAZZONI, Fernando A. **Motor Elétrico de Tração de corrente contínua**. Contagem: O Lutador, 2008.

FABRYCKY, Wolter J. e BLANCHARD, Benjamin. **Life-Cycle Cost and Economic Analysis**. Encglewwod Cliffs, Estados Unidos: Prentice-Hall, 1991.

GE TRANSPORTATION. **GEK-114379, Scheduled Maintenance, 16-Cylinder AC44i Locomotive**. - Erie, Estados Unidos: GE Technical Publications Department, 2008.

GENERAL ELECTRIC DO BRASIL. **Programa de Inspeções e Lubrificação para locomotivas diesel-elétricas equipadas com motores diesel GE**. Campinas: General Electric do Brasil S.A., 1976.

GIL, Antônio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

NEW SOUTH WALES TREASURY DEPARTMENT. **Life Cycle Costing Guideline**. Sidney, Australia: NSW Treasury Publications, 2004.

PRICEWATERHOUSE COOPERS INC. **Imposto de renda diferido: conceitos básicos na divulgação da reconciliação de alíquota**, n. 38. São Paulo : PwC, 2011.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE) **Reliability and Maintainability Guideline for Manufacturing Machinery**. - Warrendale, PA, Estados Unidos : SAE, 1999.

UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE **Electronic Reliability Design Handbook: Military Handbook 338B** – Fort Belvoir, Estados Unidos: Defense Quality and Standardization Office, 1998.

VOLMANN, Thomas E.; BERRY, William L. **Manufacturing Planning and Control Systems for Supply Chain Management**. Nova Iorque, Estados Unidos : McGraw-Hill, 1997.

APÊNDICE A

Esse apêndice apresenta o detalhamento dos cálculos para o resultado financeiro da alternativa 1 do LCC do motor diesel ferroviário.

A tabela A1 apresenta o número de falhas esperado para os conjuntos de força utilizados no estudo da alternativa 1. A coluna N contém quantos conjuntos foram instalados no ano em questão, e cada coluna representa a parcela dos componentes que terão falhado até o fim do ano corrente baseando-se na probabilidade de falha para o ano em operação como consta na tabela 5.

Tabela A-1 – Número de falhas esperado por ano para conjuntos de força da alternativa 1.

CONJUNTO DE FORÇA	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1º ANO	16	3,27	6,19	4,96	1,43	0,15	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2º ANO	3,27	-	0,67	1,27	1,01	0,29	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3º ANO	6,85	-	-	1,40	2,65	2,12	0,61	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4º ANO	7,62	-	-	-	1,56	2,95	2,36	0,68	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
5º ANO	6,66	-	-	-	-	1,36	2,57	2,06	0,60	0,06	0,00	0,00	0,00
6º ANO	6,87	-	-	-	-	-	1,41	2,66	2,13	0,62	0,06	0,00	0,00
7º ANO	6,99	-	-	-	-	-	-	1,43	2,70	2,16	0,63	0,06	0,00
8º ANO	6,90	-	-	-	-	-	-	-	1,41	2,67	2,14	0,62	0,06
9º ANO	6,91	-	-	-	-	-	-	-	-	1,41	2,67	2,14	0,62
10º ANO	6,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,42	2,68	2,14
11º ANO	6,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,41	2,67
12º ANO	6,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,41
TOTAL	-	3,27	6,85	7,62	6,66	6,87	6,99	6,90	6,91	6,92	6,91	6,92	6,92

Fonte: Autoria própria

Durante uma manutenção corretiva, há dois custos associados a cada uma delas: custo da peça e custo da mão de obra necessária para trocar a peça. Assim, o custo anual por manutenção corretiva é:

$$\text{Custo MC} = N^{\circ} \text{ Falhas} * (\text{Custo Peça} + \text{Custo M. O.})$$

Equação A-1 – Equação básica do custo de cada manutenção corretiva.

Tabela A-2 – Custo direto no orçamento causa de manutenção corretiva devido ao número de falhas do conjunto de força esperado da tabela A-1.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	16,00	18.226,95	34.437,38	27.589,23	7.979,01	822,99	29,83	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2º ANO	3,27	-	3.729,23	7.045,89	5.644,76	1.632,50	168,38	6,10	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
3º ANO	6,85	-	-	7.808,89	14.753,86	11.819,93	3.418,41	352,59	12,78	0,16	0,00	0,00	0,00
4º ANO	7,62	-	-	-	8.684,04	16.407,34	13.144,61	3.801,52	392,10	14,21	0,18	0,00	0,00
5º ANO	6,66	-	-	-	-	7.582,82	14.326,72	11.477,74	3.319,44	342,38	12,41	0,16	0,00
6º ANO	6,87	-	-	-	-	-	7.829,14	14.792,11	11.850,58	3.427,27	353,50	12,81	0,16
7º ANO	6,99	-	-	-	-	-	-	7.962,44	15.043,96	12.052,35	3.485,63	359,52	13,03
8º ANO	6,90	-	-	-	-	-	-	-	7.855,18	14.841,32	11.890,00	3.438,67	354,68
9º ANO	6,91	-	-	-	-	-	-	-	-	7.871,81	14.872,73	11.915,17	3.445,95
10º ANO	6,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.887,23	14.901,86	11.938,51
11º ANO	6,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.877,44	14.883,38
12º ANO	6,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.878,25
Total	-	18.226,95	38.166,62	42.444,01	37.061,66	38.265,59	38.917,09	38.392,87	38.474,13	38.549,50	38.501,68	38.505,64	38.513,96

Fonte: Autoria própria.

Nota: Valores em reais.

Para estimar o custo de oportunidade por locomotiva parada realizando manutenção, utiliza-se do tempo médio entre reparos de cada componente, como na equação A-2.

$$\text{Custo Oportunidade Loco Parada} = N^{\circ} \text{ Falhas} * \text{Custo Hora Locomotiva Parada} * \text{MTTR}$$

Equação A-2 – Equação básica do custo de oportunidade da locomotiva parada.

Esse custo da hora de locomotiva parada é de 619,17 reais. Os custos estão detalhados ano a ano na tabela A-3.

Tabela A-3 – Custo de oportunidade por locomotiva parada devido ao número de falhas esperado da tabela A-1.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	16,00	170.687	322.489	258.360	74.720	7.707	279	3	0	0	0	0	0
2º ANO	3,27	-	34.922	65.981	52.860	15.288	1.577	57	1	0	0	0	0
3º ANO	6,85	-	-	73.126	138.163	110.688	32.012	3.302	120	1	0	0	0
4º ANO	7,62	-	-	-	81.322	153.647	123.093	35.599	3.672	133	2	0	0
5º ANO	6,66	-	-	-	-	71.009	134.163	107.483	31.085	3.206	116	1	0
6º ANO	6,87	-	-	-	-	-	73.316	138.521	110.975	32.095	3.310	120	1
7º ANO	6,99	-	-	-	-	-	-	74.564	140.879	112.864	32.641	3.367	122
8º ANO	6,90	-	-	-	-	-	-	-	73.560	138.982	111.344	32.202	3.321
9º ANO	6,91	-	-	-	-	-	-	-	-	73.716	139.276	111.580	32.270
10º ANO	6,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	73.860	139.549	111.798
11º ANO	6,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	73.768	139.376
12º ANO	6,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	73.776
Total	-	170.687	357.412	397.468	347.064	358.339	364.440	359.531	360.292	360.997	360.550	360.587	360.665

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Já o custo de oportunidade por trem parado é estimado da mesma forma que a locomotiva parada, mas utilizando o custo de oportunidade por trem parado, mas tem uma nova variável, a relação de impacto/trocas, ou seja, qual a porcentagem de falhas que dão impacto no trecho e o trem para, explanado na equação A-3.

$$\text{Custo Oportunidade Trem Parado} = N^{\circ} \text{Falhas} * \text{Custo Hora Trem Parado} * \text{Relação Impacto/Troca}$$

Equação A-3 – Equação básica do custo de oportunidade do trem parado.

O custo estimado do trem parado é de 22.966,29. Os custos são mostrados na tabela A-4.

Tabela A-4 – Custo de oportunidade por trem parado devido ao número de falhas esperado da tabela A-1.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	16,00	12.511	23.639	18.938	5.477	565	20	0	0	0	0	0	0
2º ANO	3,27	-	2.560	4.836	3.875	1.121	116	4	0	0	0	0	0
3º ANO	6,85	-	-	5.360	10.127	8.113	2.346	242	9	0	0	0	0
4º ANO	7,62	-	-	-	5.961	11.262	9.023	2.609	269	10	0	0	0
5º ANO	6,66	-	-	-	-	5.205	9.834	7.879	2.279	235	9	0	0
6º ANO	6,87	-	-	-	-	-	5.374	10.154	8.135	2.353	243	9	0
7º ANO	6,99	-	-	-	-	-	-	5.466	10.327	8.273	2.393	247	9
8º ANO	6,90	-	-	-	-	-	-	-	5.392	10.187	8.162	2.360	243
9º ANO	6,91	-	-	-	-	-	-	-	-	5.403	10.209	8.179	2.365
10º ANO	6,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.414	10.229	8.195
11º ANO	6,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.407	10.216
12º ANO	6,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.408
Total	-	12.511	26.199	29.135	25.440	26.266	26.714	26.354	26.410	26.461	26.429	26.431	26.437

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Os custos do turbo tem os mesmos princípios de cálculo que o do conjunto de força. Na tabela A-5, está o número de falhas esperado para o turbo durante os 12 anos do estudo.

Tabela A-5 – Número de falhas esperado por ano para turbos da alternativa 1.

TURBO	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1º ANO	1	0,38	0,28	0,16	0,09	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
2º ANO	0,38	-	0,14	0,10	0,06	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3º ANO	0,42	-	-	0,16	0,12	0,07	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
4º ANO	0,43	-	-	-	0,16	0,12	0,07	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
5º ANO	0,43	-	-	-	-	0,16	0,12	0,07	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00
6º ANO	0,43	-	-	-	-	-	0,16	0,12	0,07	0,04	0,02	0,01	0,00
7º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	0,16	0,12	0,07	0,04	0,02	0,01
8º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	0,16	0,12	0,07	0,04	0,02
9º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16	0,12	0,07	0,04
10º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16	0,12	0,07
11º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16	0,12
12º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16
Total	-	0,38	0,42	0,43									

Fonte: Autoria própria

O custo de manutenção corretiva do turbo se segue na tabela A-6, o custo de oportunidade por locomotiva parada causa turbo está na tabela A-7. Na tabela A-8 está o custo de oportunidade por trem parado por causa de falha de turbo.

Tabela A-6 – Custo direto no orçamento por causa de manutenção corretiva devido ao número de falhas de turbo esperado da tabela A-3.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	1,00	11.882,10	8.799,11	5.210,28	2.853,37	1.487,95	747,96	365,30	174,13	81,28	37,25	16,80	7,46
2º ANO	0,38	-	4.458,17	3.301,43	1.954,90	1.070,59	558,28	280,64	137,06	65,33	30,50	13,98	6,30
3º ANO	0,42	-	-	4.974,13	3.683,51	2.181,14	1.194,49	622,89	313,12	152,92	72,90	34,03	15,60
4º ANO	0,43	-	-	-	5.059,88	3.747,02	2.218,75	1.215,08	633,63	318,51	155,56	74,15	34,61
5º ANO	0,43	-	-	-	-	5.084,59	3.765,31	2.229,58	1.221,02	636,72	320,07	156,32	74,51
6º ANO	0,43	-	-	-	-	-	5.091,95	3.770,76	2.232,81	1.222,78	637,65	320,53	156,54
7º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	5.093,99	3.772,28	2.233,70	1.223,27	637,90	320,66
8º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	5.094,56	3.772,70	2.233,95	1.223,41	637,97
9º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	5.094,69	3.772,79	2.234,01	1.223,44
10º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.094,71	3.772,81	2.234,02
11º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.094,71	3.772,81
12º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.094,70
Total	-	11.882,10	13.257,27	13.485,83	13.551,67	13.571,29	13.576,74	13.578,24	13.578,59	13.578,64	13.578,64	13.578,64	13.578,63

Fonte: Autoria própria.

Nota: Valores em reais.

Tabela A-7 – Custo de oportunidade por locomotiva parada devido ao número de falhas de turbo esperado da tabela A-3.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	1,00	58.938	43.645	25.844	14.153	7.381	3.710	1.812	864	403	185	83	37
2º ANO	0,38	-	22.113	16.376	9.697	5.310	2.769	1.392	680	324	151	69	31
3º ANO	0,42	-	-	24.673	18.271	10.819	5.925	3.090	1.553	759	362	169	77
4º ANO	0,43	-	-	-	25.098	18.586	11.005	6.027	3.143	1.580	772	368	172
5º ANO	0,43	-	-	-	-	25.221	18.677	11.059	6.056	3.158	1.588	775	370
6º ANO	0,43	-	-	-	-	-	25.257	18.704	11.075	6.065	3.163	1.590	776
7º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	25.267	18.711	11.080	6.068	3.164	1.591

(continua)

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	(conclusão)		
											10º ANO	11º ANO	12º ANO
8º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	25.270	18.713	11.081	6.068	3.164
9º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	25.271	18.714	11.081	6.069
10º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.271	18.714	11.081
11º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.271	18.714
12º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.271
Total	-	58.938	65.759	66.893	67.219	67.316	67.343	67.351	67.353	67.353	67.353	67.353	67.353

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Tabela A-8 – Custo de oportunidade por trem parado devido ao número de falhas esperado de turbo da tabela A-3.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	1,00	3.663	2.712	1.606	880	459	231	113	54	25	11	5	2
2º ANO	0,16	-	1.374	1.018	603	330	172	87	42	20	9	4	2
3º ANO	0,18	-	-	1.533	1.135	672	368	192	97	47	22	10	5
4º ANO	0,19	-	-	-	1.560	1.155	684	375	195	98	48	23	11
5º ANO	0,19	-	-	-	-	1.567	1.161	687	376	196	99	48	23
6º ANO	0,19	-	-	-	-	-	1.570	1.162	688	377	197	99	48
7º ANO	0,19	-	-	-	-	-	-	1.570	1.163	689	377	197	99
8º ANO	0,19	-	-	-	-	-	-	-	1.570	1.163	689	377	197
9º ANO	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-	1.570	1.163	689	377
10º ANO	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.570	1.163	689
11º ANO	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.570	1.163
12º ANO	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.570
Total	-	3.663	4.087	4.157	4.177	4.183	4.185	4.186	4.186	4.186	4.186	4.186	4.186

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Virabrequim	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604
Bloco	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604
Eixo de comando	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294
Engrenagens	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572
Bomba de óleo	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758
Bomba d'água	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465
Bomba injetora	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479
Governador	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641
Outros	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327
Custo Oportunidade Trem	30.779	44.890	47.896	44.222	45.054	45.503	45.144	45.200	45.251	45.219	45.221	45.227
Total Oportunidade Trem	30.779	44.890	47.896	44.222	45.054	45.503	45.144	45.200	45.251	45.219	45.221	45.227

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores em reais e centavos suprimidos para melhor visualização

APÊNDICE B

Esse apêndice apresenta o detalhamento dos cálculos para o resultado financeiro da alternativa 2 do LCC do Motor diesel ferroviário.

A tabela B-1 apresenta o número de falhas esperado para os conjuntos de força utilizados no estudo da alternativa 2. A coluna N contém quantos conjuntos foram instalados no ano em questão, e cada coluna representa a parcela dos componentes que terão falhado até o fim do ano corrente baseando-se na probabilidade de falha para o ano em operação como consta na tabela 5.

Tabela B-1 – Número de falhas esperado por ano para conjuntos de força da alternativa 2.

CONJUNTO DE FORÇA	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1º ANO	16	3,27	6,19	4,96	1,43	0,15	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2º ANO	3,27	-	0,67	1,27	1,01	0,29	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3º ANO	6,85	-	-	1,40	2,65	2,12	0,61	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4º ANO	7,62	-	-	-	1,56	2,95	2,36	0,68	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
5º ANO	6,66	-	-	-	-	1,36	2,57	2,06	0,60	0,06	0,00	0,00	0,00
6º ANO	6,87	-	-	-	-	-	1,41	2,66	2,13	0,62	0,06	0,00	0,00
7º ANO	6,99	-	-	-	-	-	-	1,43	2,70	2,16	0,63	0,06	0,00
8º ANO	6,90	-	-	-	-	-	-	-	1,41	2,67	2,14	0,62	0,06
9º ANO	6,91	-	-	-	-	-	-	-	-	1,41	2,67	2,14	0,62
10º ANO	6,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,42	2,68	2,14
11º ANO	6,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,41	2,67
12º ANO	6,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,41
TOTAL	-	3,27	6,85	7,62	6,66	6,87	6,99	6,90	6,91	6,92	6,91	6,92	6,92

Fonte: Autoria própria

Durante uma manutenção corretiva, há dois custos associados a cada uma delas: custo da peça e custo da mão de obra necessária para trocar a peça. Assim, o custo anual por manutenção corretiva é:

$$\text{Custo MC} = N^{\circ} \text{ Falhas} * (\text{Custo Peça} + \text{Custo M. O.})$$

Equação B-1 – Equação básica do custo de cada manutenção corretiva.

Tabela B-2 – Custo direto no orçamento causa de manutenção corretiva devido ao número de falhas do conjunto de força esperado da tabela B-1.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	16,00	18.226,95	34.437,38	27.589,23	7.979,01	822,99	29,83	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2º ANO	3,27	-	3.729,23	7.045,89	5.644,76	1.632,50	168,38	6,10	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
3º ANO	6,85	-	-	7.808,89	14.753,86	11.819,93	3.418,41	352,59	12,78	0,16	0,00	0,00	0,00
4º ANO	7,62	-	-	-	8.684,04	16.407,34	13.144,61	3.801,52	392,10	14,21	0,18	0,00	0,00
5º ANO	6,66	-	-	-	-	7.582,82	14.326,72	11.477,74	3.319,44	342,38	12,41	0,16	0,00
6º ANO	6,87	-	-	-	-	-	7.829,14	14.792,11	11.850,58	3.427,27	353,50	12,81	0,16
7º ANO	6,99	-	-	-	-	-	-	7.962,44	15.043,96	12.052,35	3.485,63	359,52	13,03
8º ANO	6,90	-	-	-	-	-	-	-	7.855,18	14.841,32	11.890,00	3.438,67	354,68
9º ANO	6,91	-	-	-	-	-	-	-	-	7.871,81	14.872,73	11.915,17	3.445,95
10º ANO	6,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.887,23	14.901,86	11.938,51
11º ANO	6,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.877,44	14.883,38
12º ANO	6,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.878,25
Total	-	18.226,95	38.166,62	42.444,01	37.061,66	38.265,59	38.917,09	38.392,87	38.474,13	38.549,50	38.501,68	38.505,64	38.513,96

Fonte: Autoria própria.

Nota: Valores em reais.

Para estimar o custo de oportunidade por locomotiva parada realizando manutenção, utiliza-se do tempo médio entre reparos de cada componente, como na equação B-2.

$$\text{Custo Oportunidade Loco Parada} = N^{\circ} \text{ Falhas} * \text{Custo Hora Locomotiva Parada} * \text{MTTR}$$

Equação B-2 – Equação básica do custo de oportunidade da locomotiva parada.

Esse custo da hora de locomotiva parada é de 619,17 reais. Os custos estão detalhados ano a ano na tabela B-3.

Tabela B-3 – Custo de oportunidade por locomotiva parada devido ao número de falhas esperado da tabela B-1.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	16,00	121.919	230.350	184.543	53.371	5.505	200	2	0	0	0	0	0
2º ANO	3,27	-	24.945	47.130	37.757	10.920	1.126	41	1	0	0	0	0
3º ANO	6,85	-	-	52.233	98.688	79.063	22.866	2.358	85	1	0	0	0
4º ANO	7,62	-	-	-	58.087	109.748	87.924	25.428	2.623	95	1	0	0
5º ANO	6,66	-	-	-	-	50.721	95.831	76.774	22.204	2.290	83	1	0
6º ANO	6,87	-	-	-	-	-	52.369	98.944	79.268	22.925	2.365	86	1
7º ANO	6,99	-	-	-	-	-	-	53.260	100.628	80.617	23.315	2.405	87
8º ANO	6,90	-	-	-	-	-	-	-	52.543	99.273	79.531	23.001	2.372
9º ANO	6,91	-	-	-	-	-	-	-	-	52.654	99.483	79.700	23.050
10º ANO	6,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52.757	99.678	79.856
11º ANO	6,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52.692	99.554
12º ANO	6,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52.692
Total	-	121.919	255.294	283.905	247.903	255.956	260.314	256.808	257.351	257.855	257.535	257.562	257.612

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Já o custo de oportunidade por trem parado é estimado da mesma forma que a locomotiva parada, mas utilizando o custo de oportunidade por trem parado, mas tem uma nova variável, a relação de impacto/trocas, ou seja, qual a porcentagem de falhas que dão impacto no trecho e o trem para, explanado na equação B-3.

$$\text{Custo Oportunidade Trem Parado} = N^{\circ} \text{Falhas} * \text{Custo Hora Trem Parado} * \text{Relação Impacto/Troca}$$

Equação B-3 – Equação básica do custo de oportunidade do trem parado.

O custo estimado do trem parado é de 22.966,29. Os custos são mostrados na tabela B-4.

Tabela B-4 – Custo de oportunidade por trem parado devido ao número de falhas esperado da tabela B-1.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	16,00	12.511	23.639	18.938	5.477	565	20	0	0	0	0	0	0
2º ANO	3,27		2.560	4.836	3.875	1.121	116	4	0	0	0	0	0
3º ANO	6,85			5.360	10.127	8.113	2.346	242	9	0	0	0	0
4º ANO	7,62				5.961	11.262	9.023	2.609	269	10	0	0	0
5º ANO	6,66					5.205	9.834	7.879	2.279	235	9	0	0
6º ANO	6,87						5.374	10.154	8.135	2.353	243	9	0
7º ANO	6,99							5.466	10.327	8.273	2.393	247	9
8º ANO	6,90								5.392	10.187	8.162	2.360	243
9º ANO	6,91									5.403	10.209	8.179	2.365
10º ANO	6,92										5.414	10.229	8.195
11º ANO	6,91											5.407	10.216
12º ANO	6,92												5.407
Total	-	12.511	26.199	29.135	25.440	26.266	26.714	26.354	26.410	26.461	26.429	26.431	26.436

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Os custos do turbo tem os mesmos princípios de cálculo que o do conjunto de força. Na tabela B-5, está o número de falhas esperado para o turbo durante os 12 anos do estudo.

Tabela B-5 – Número de falhas esperado por ano para turbos da alternativa 2.

TURBO	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1º ANO	1	0,38	0,28	0,16	0,09	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
2º ANO	0,38	-	0,14	0,10	0,06	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3º ANO	0,42	-	-	0,16	0,12	0,07	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
4º ANO	0,43	-	-	-	0,16	0,12	0,07	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
5º ANO	0,43	-	-	-	-	0,16	0,12	0,07	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00
6º ANO	0,43	-	-	-	-	-	0,16	0,12	0,07	0,04	0,02	0,01	0,00
7º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	0,16	0,12	0,07	0,04	0,02	0,01
8º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	0,16	0,12	0,07	0,04	0,02
9º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16	0,12	0,07	0,04
10º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16	0,12	0,07
11º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16	0,12
12º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16
Total	-	0,38	0,42	0,43									

Fonte: Autoria própria

O custo de manutenção corretiva do turbo se segue na tabela B-6, o custo de oportunidade por locomotiva parada causa turbo está na tabela B-7. Na tabela B-8 está o custo de oportunidade por trem parado por causa de falha de turbo.

Tabela B-6 – Custo direto no orçamento por causa de manutenção corretiva devido ao número de falhas de turbo esperado da tabela B-3.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	1,00	11.882,10	8.799,11	5.210,28	2.853,37	1.487,95	747,96	365,30	174,13	81,28	37,25	16,80	7,46
2º ANO	0,38	-	4.458,17	3.301,43	1.954,90	1.070,59	558,28	280,64	137,06	65,33	30,50	13,98	6,30
3º ANO	0,42	-	-	4.974,13	3.683,51	2.181,14	1.194,49	622,89	313,12	152,92	72,90	34,03	15,60
4º ANO	0,43	-	-	-	5.059,88	3.747,02	2.218,75	1.215,08	633,63	318,51	155,56	74,15	34,61
5º ANO	0,43	-	-	-	-	5.084,59	3.765,31	2.229,58	1.221,02	636,72	320,07	156,32	74,51
6º ANO	0,43	-	-	-	-	-	5.091,95	3.770,76	2.232,81	1.222,78	637,65	320,53	156,54
7º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	5.093,99	3.772,28	2.233,70	1.223,27	637,90	320,66
8º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	5.094,56	3.772,70	2.233,95	1.223,41	637,97
9º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	5.094,69	3.772,79	2.234,01	1.223,44
10º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.094,71	3.772,81	2.234,02
11º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.094,71	3.772,81
12º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.094,70
Total	-	11.882,10	13.257,27	13.485,83	13.551,67	13.571,29	13.576,74	13.578,24	13.578,59	13.578,64	13.578,64	13.578,64	13.578,63

Fonte: Autoria própria.

Nota: Valores em reais.

Tabela B-7 – Custo de oportunidade por locomotiva parada devido ao número de falhas de turbo esperado da tabela B-3.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	1,00	29.469	21.823	12.922	7.077	3.690	1.855	906	432	202	92	42	19
2º ANO	0,38	-	11.057	8.188	4.848	2.655	1.385	696	340	162	76	35	16
3º ANO	0,42	-	-	12.336	9.135	5.409	2.962	1.545	777	379	181	84	39
4º ANO	0,43	-	-	-	12.549	9.293	5.503	3.014	1.571	790	386	184	86
5º ANO	0,43	-	-	-	-	12.610	9.338	5.530	3.028	1.579	794	388	185
6º ANO	0,43	-	-	-	-	-	12.629	9.352	5.538	3.033	1.581	795	388
7º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	12.634	9.356	5.540	3.034	1.582	795

(continua)

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	(conclusão)		
											10º ANO	11º ANO	12º ANO
8º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	12.635	9.357	5.540	3.034	1.582
9º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	12.635	9.357	5.541	3.034
10º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.635	9.357	5.541
11º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.635	9.357
12º ANO	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.635
Total	-	29.469	32.879	33.446	33.610	33.658	33.672	33.675	33.676	33.676	33.676	33.676	33.676

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Tabela B-8 – Custo de oportunidade por trem parado devido ao número de falhas esperado de turbo da tabela B-3.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	1,00	3.663	2.712	1.606	880	459	231	113	54	25	11	5	2
2º ANO	0,16	-	1.374	1.018	603	330	172	87	42	20	9	4	2
3º ANO	0,18	-	-	1.533	1.135	672	368	192	97	47	22	10	5
4º ANO	0,19	-	-	-	1.560	1.155	684	375	195	98	48	23	11
5º ANO	0,19	-	-	-	-	1.567	1.161	687	376	196	99	48	23
6º ANO	0,19	-	-	-	-	-	1.570	1.162	688	377	197	99	48
7º ANO	0,19	-	-	-	-	-	-	1.570	1.163	689	377	197	99
8º ANO	0,19	-	-	-	-	-	-	-	1.570	1.163	689	377	197
9º ANO	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-	1.570	1.163	689	377
10º ANO	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.570	1.163	689
11º ANO	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.570	1.163
12º ANO	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.570
Total	-	3.663	4.087	4.157	4.177	4.183	4.185	4.186	4.186	4.186	4.186	4.186	4.186

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Tabela B-9 – Custo detalhados de gastos em manutenção corretiva por componente em todo o ciclo do motor diesel da alternativa 2.

	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Óleo combustível	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578
Óleo lubrificante	48.723	48.723	48.723	48.723	48.723	48.723	48.723	48.723	48.723	48.723	48.723	48.723
Custo Total Energia	627.301											
Conjunto de força	18.227	38.167	42.444	37.062	38.266	38.917	38.393	38.474	38.550	38.502	38.506	38.513
Biela	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501
Turbo	11.882	13.257	13.486	13.552	13.571	13.577	13.578	13.579	13.579	13.579	13.579	13.579
Virabrequim	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649
Bloco	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352
Eixo de comando	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184
Engrenagens	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154
Bomba de óleo	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372
Bomba d'água	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137
Bomba injetora	307	307	307	307	307	307	307	307	307	307	307	307
Governador	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268
Outros	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348
Estoque e Produção	1.477	1.477	1.477	1.477	1.477	1.477	1.477	1.477	1.477	1.477	1.477	1.477
Peças sobressalentes	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641
Custo Total Peças	46.500	67.815	72.321	67.004	68.228	68.885	68.362	68.444	68.519	68.471	68.475	68.483
Total Orçamento	673.801	695.115	699.621	694.305	695.528	696.185	695.663	695.744	695.820	695.772	695.776	695.783

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores em reais e centavos suprimidos para melhor visualização

Tabela B-10 – Custos de oportunidade por locomotiva parado. Detalhado por componente em todo o ciclo do motor diesel da alternativa 2.

	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Óleo combustível	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Óleo lubrificante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custo Total Energia	0											
Conjunto de força	121.919	255.294	283.905	247.903	255.956	260.314	256.808	257.351	257.855	257.535	257.562	257.612
Biela	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808
Turbo	29.469	32.879	33.446	33.610	33.658	33.672	33.675	33.676	33.676	33.676	33.676	33.676
Virabrequim	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654
Bloco	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654
Eixo de comando	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187
Engrenagens	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362
Bomba de óleo	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518
Bomba d'água	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080
Bomba injetora	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347
Governador	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934
Outros	2.647	2.647	2.647	2.647	2.647	2.647	2.647	2.647	2.647	2.647	2.647	2.647
Oportunidade												
Sobressalentes	677	677	677	677	677	677	677	677	677	677	677	677
Custo Oportunidade Locomotiva	280.256	417.042	446.220	410.381	418.483	422.854	419.351	419.896	420.400	420.080	420.107	420.157
Total Oportunidade Locomotiva	280.256	417.042	446.220	410.381	418.483	422.854	419.351	419.896	420.400	420.080	420.107	420.157

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores em reais e centavos suprimidos para melhor visualização

Tabela B-11 – Custos de oportunidade por trem parado. Detalhado por componente em todo o ciclo do motor diesel da alternativa 2.

	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Óleo combustível	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Óleo lubrificante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custo Total Energia	0											
Conjunto de força	12.511	26.199	29.135	25.440	26.266	26.714	26.354	26.410	26.461	26.429	26.431	26.436
Biela	862	862	862	862	862	862	862	862	862	862	862	862
Turbo	3.663	4.087	4.157	4.177	4.183	4.185	4.186	4.186	4.186	4.186	4.186	4.186
Virabrequim	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604
Bloco	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604
Eixo de comando	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294
Engrenagens	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572
Bomba de óleo	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758
Bomba d'água	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465
Bomba injetora	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479
Governador	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641
Outros	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327
Custo Oportunidade Trem	30.779	44.890	47.896	44.222	45.054	45.503	45.144	45.200	45.251	45.219	45.221	45.227
Total Oportunidade Trem	30.779	44.890	47.896	44.222	45.054	45.503	45.144	45.200	45.251	45.219	45.221	45.227

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores em reais e centavos suprimidos para melhor visualização

APÊNDICE C

Esse apêndice apresenta o detalhamento dos cálculos para o resultado financeiro da alternativa 3 do LCC do Motor diesel ferroviário.

A tabela C-1 apresenta o número de falhas esperado para os conjuntos de força utilizados no estudo da alternativa 3. A coluna N contém quantos conjuntos foram instalados no ano em questão, e cada coluna representa a parcela dos componentes que terão falhado até o fim do ano corrente baseando-se na probabilidade de falha para o ano em operação como consta na tabela 11.

Tabela C-1 – Número de falhas esperado por ano para conjuntos de força da alternativa 3.

CONJUNTO DE FORÇA	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1º ANO	16	3,27	6,19	4,96	1,43	-	-	-	-	-	-	-	-
2º ANO	3,27	-	0,67	1,27	1,01	-	-	-	-	-	-	-	-
3º ANO	6,85	-	-	1,40	2,65	-	-	-	-	-	-	-	-
4º ANO	7,62	-	-	-	1,56	-	-	-	-	-	-	-	-
5º ANO	16,00	-	-	-	-	3,27	6,19	4,96	1,43	-	-	-	-
6º ANO	3,27	-	-	-	-	-	0,67	1,27	1,01	-	-	-	-
7º ANO	6,85	-	-	-	-	-	-	1,40	2,65	-	-	-	-
8º ANO	7,62	-	-	-	-	-	-	-	1,56	-	-	-	-
9º ANO	16,00	-	-	-	-	-	-	-	-	3,27	6,19	4,96	1,43
10º ANO	3,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,67	1,27	1,01
11º ANO	6,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,40	2,65
12º ANO	7,62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,56
TOTAL	-	3,27	6,85	7,62	6,66	3,27	6,85	7,62	6,66	3,27	6,85	7,62	6,66

Fonte: Autoria própria

Durante uma manutenção corretiva, há dois custos associados a cada uma delas: custo da peça e custo da mão de obra necessária para trocar a peça. Assim, o custo anual por manutenção corretiva é:

$$\text{Custo MC} = N^{\circ} \text{ Falhas} * (\text{Custo Peça} + \text{Custo M. O.})$$

Equação C-1 – Equação básica do custo de cada manutenção corretiva.

Tabela C-2 – Custo direto no orçamento causa de manutenção corretiva devido ao número de falhas do conjunto de força esperado da tabela C-1.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	16	18.227	34.437	27.589	7.979	-	-	-	-	-	-	-	-
2º ANO	3,27	-	3.729	7.046	5.645	-	-	-	-	-	-	-	-
3º ANO	6,85	-	-	7.809	14.754	-	-	-	-	-	-	-	-
4º ANO	7,62	-	-	-	8.684	-	-	-	-	-	-	-	-
5º ANO	16,00	-	-	-	-	18.227	34.437	27.589	7.979	-	-	-	-
6º ANO	3,27	-	-	-	-	-	3.729	7.046	5.645	-	-	-	-
7º ANO	6,85	-	-	-	-	-	-	7.809	14.754	-	-	-	-
8º ANO	7,62	-	-	-	-	-	-	-	8.684	-	-	-	-
9º ANO	16,00	-	-	-	-	-	-	-	-	18.227	34.437	27.589	7.979
10º ANO	3,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.729	7.046	5.645
11º ANO	6,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.809	14.754
12º ANO	7,62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.684
Total	-	18.227	38.167	42.444	37.062	18.227	38.167	42.444	37.062	18.227	38.167	42.444	37.062

Fonte: Autoria própria.

Nota: Valores em reais.

Para estimar o custo de oportunidade por locomotiva parada realizando manutenção, utiliza-se do tempo médio entre reparos de cada componente, como na equação C-2.

$$\text{Custo Oportunidade Loco Parada} = N^{\circ} \text{ Falhas} * \text{Custo Hora Locomotiva Parada} * \text{MTTR}$$

Equação C-2 – Equação básica do custo de oportunidade da locomotiva parada.

Esse custo da hora de locomotiva parada é de 619,17 reais. Os custos estão detalhados ano a ano na tabela C-3.

Tabela C-3 – Custo de oportunidade por locomotiva parada devido ao número de falhas esperado da tabela C-1.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	16,00	121.919	230.350	184.543	53.371	-	-	-	-	-	-	-	-
2º ANO	3,27	-	24.945	47.130	37.757	-	-	-	-	-	-	-	-
3º ANO	6,85	-	-	52.233	98.688	-	-	-	-	-	-	-	-
4º ANO	7,62	-	-	-	58.087	-	-	-	-	-	-	-	-
5º ANO	16,00	-	-	-	-	121.919	230.350	184.543	53.371	-	-	-	-
6º ANO	3,27	-	-	-	-	-	24.945	47.130	37.757	-	-	-	-
7º ANO	6,85	-	-	-	-	-	-	52.233	98.688	-	-	-	-
8º ANO	7,62	-	-	-	-	-	-	-	58.087	-	-	-	-
9º ANO	16,00	-	-	-	-	-	-	-	-	121.919	230.350	184.543	53.371
10º ANO	3,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24.945	47.130	37.757
11º ANO	6,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52.233	98.688
12º ANO	7,62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58.087
Total	-	121.919	255.294	283.905	247.903	121.919	255.294	283.905	247.903	121.919	255.294	283.905	247.903

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Já o custo de oportunidade por trem parado é estimado da mesma forma que a locomotiva parada, mas utilizando o custo de oportunidade por trem parado, mas tem uma nova variável, a relação de impacto/trocas, ou seja, qual a porcentagem de falhas que dão impacto no trecho e o trem para, explanado na equação C-3.

$$\text{Custo Oportunidade Trem Parado} = N^{\circ} \text{Falhas} * \text{Custo Hora Trem Parado} * \text{Relação Impacto/Troca}$$

Equação C-3 – Equação básica do custo de oportunidade do trem parado.

O custo estimado do trem parado é de 22.966,29. Os custos são mostrados na tabela C-4.

Tabela C-4 – Custo de oportunidade por trem parado devido ao número de falhas esperado da tabela C-1.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	16,00	9.557	18.057	14.466	4.184	-	-	-	-	-	-	-	-
2º ANO	3,27	-	1.955	3.694	2.960	-	-	-	-	-	-	-	-
3º ANO	6,85	-	-	4.095	7.736	-	-	-	-	-	-	-	-
4º ANO	7,62	-	-	-	4.553	-	-	-	-	-	-	-	-
5º ANO	16,00	-	-	-	-	9.557	18.057	14.466	4.184	-	-	-	-
6º ANO	3,27	-	-	-	-	-	1.955	3.694	2.960	-	-	-	-
7º ANO	6,85	-	-	-	-	-	-	4.095	7.736	-	-	-	-
8º ANO	7,62	-	-	-	-	-	-	-	4.553	-	-	-	-
9º ANO	16,00	-	-	-	-	-	-	-	-	9.557	18.057	14.466	4.184
10º ANO	3,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.955	3.694	2.960
11º ANO	6,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.095	7.736
12º ANO	7,62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.553
Total		9.557	20.012	22.255	19.433	9.557	20.012	22.255	19.433	9.557	20.012	22.255	19.433

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Os custos do turbo tem os mesmos princípios de cálculo que o do conjunto de força. Na tabela C-5, está o número de falhas esperado para o turbo durante os 12 anos do estudo.

Tabela C-5 – Número de falhas esperado por ano para turbos da alternativa 3.

TURBO	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1º ANO	1	0,38	0,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,38	-	0,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3º ANO	1,00	-	-	0,38	0,28	-	-	-	-	-	-	-	-
4º ANO	0,38	-	-	-	0,14	-	-	-	-	-	-	-	-
5º ANO	1,00	-	-	-	-	0,38	0,28	-	-	-	-	-	-
6º ANO	0,38	-	-	-	-	-	0,14	-	-	-	-	-	-
7º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	0,38	0,28	-	-	-	-
8º ANO	0,38	-	-	-	-	-	-	-	0,14	-	-	-	-
9º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	0,38	0,28	-	-
10º ANO	0,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,14	-	-
11º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,38	0,28
12º ANO	0,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,14
Total	-	0,38	0,42										

Fonte: Autoria própria

O custo de manutenção corretiva do turbo se segue na tabela C-6, o custo de oportunidade por locomotiva parada causa turbo está na tabela C-7. Na tabela C-8 está o custo de oportunidade por trem parado por causa de falha de turbo.

Tabela C-6 – Custo direto no orçamento por causa de manutenção corretiva devido ao número de falhas de turbo esperado da tabela C-3.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	1,00	11.882	8.799	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,38	-	4.458	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3º ANO	1,00	-	-	11.882	8.799	-	-	-	-	-	-	-	-
4º ANO	0,38	-	-	-	4.458	-	-	-	-	-	-	-	-
5º ANO	1,00	-	-	-	-	11.882	8.799	-	-	-	-	-	-
6º ANO	0,38	-	-	-	-	-	4.458	-	-	-	-	-	-
7º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	11.882	8.799	-	-	-	-
8º ANO	0,38	-	-	-	-	-	-	-	4.458	-	-	-	-
9º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	11.882	8.799	-	-
10º ANO	0,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.458	-	-
11º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.882	8.799
12º ANO	0,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.458
Total	-	11.882	13.257										

Fonte: Autoria própria.

Nota: Valores em reais.

Tabela C-7 – Custo de oportunidade por locomotiva parada devido ao número de falhas de turbo esperado da tabela C-3.

(continua)

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	1,00	29.469	21.823										
2º ANO	0,38		11.057										
3º ANO	1,00			29.469	21.823								
4º ANO	0,38				11.057								
5º ANO	1,00					29.469	21.823						
6º ANO	0,38						11.057						
7º ANO	1,00							29.469	21.823				

		(conclusão)											
	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
8º ANO	0,38	-	-	-	-	-	-	-	11.057	-	-	-	-
9º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	29.469	21.823	-	-
10º ANO	0,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.057	-	-
11º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29.469	21.823
12º ANO	0,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.057
Total	-	29.469	32.879										

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Tabela C-8 – Custo de oportunidade por trem parado devido ao número de falhas esperado de turbo da tabela C-3.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	1,00	3.663	2.712	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,38	-	1.374	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3º ANO	1,00	-	-	3.663	2.712	-	-	-	-	-	-	-	-
4º ANO	0,38	-	-	-	1.374	-	-	-	-	-	-	-	-
5º ANO	1,00	-	-	-	-	3.663	2.712	-	-	-	-	-	-
6º ANO	0,38	-	-	-	-	-	1.374	-	-	-	-	-	-
7º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	3.663	2.712	-	-	-	-
8º ANO	0,38	-	-	-	-	-	-	-	1.374	-	-	-	-
9º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	3.663	2.712	-	-
10º ANO	0,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.374	-	-
11º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.663	2.712
12º ANO	0,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.374
Total	-	3.663	4.087										

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Tabela C-9 – Custo detalhados de gastos em manutenção corretiva por componente em todo o ciclo do motor diesel da alternativa 3.

	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Óleo combustível	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578
Óleo lubrificante	28.029	28.029	28.029	28.029	28.029	28.029	28.029	28.029	28.029	28.029	28.029	28.029
Custo Total Energia	606.606											
Conjunto de força	18.227	38.167	42.444	37.062	18.227	38.167	42.444	37.062	18.227	38.167	42.444	37.062
Biela	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501	1.501
Turbo	11.882	13.257	11.882	13.257	11.882	13.257	11.882	13.257	11.882	13.257	11.882	13.257
Virabrequim	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649	4.649
Bloco	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352	1.352
Eixo de comando	275	275	275	275	275	275	275	275	275	275	275	275
Engrenagens	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Bomba de óleo	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372
Bomba d'água	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137
Bomba injetora	307	307	307	307	307	307	307	307	307	307	307	307
Governador	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268
Outros	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348	348
Estoque e Produção	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548
Peças sobressalentes	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641	5.641
Custo Peças MC	46.708	68.023	70.925	66.918	46.708	68.023	70.925	66.918	46.708	68.023	70.925	66.918
Custo Peças Prevent.	158.178	0	33.345	0	158.178	0	33.345	0	158.178		33.345	0
Total Orçamento	811.493	674.629	710.877	673.524	811.493	674.629	710.877	673.524	811.493	674.629	710.877	673.524

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores em reais e centavos suprimidos para melhor visualização

Tabela C-10 – Custos de oportunidade por locomotiva parado. Detalhado por componente em todo o ciclo do motor diesel da alternativa 3.

	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Óleo combustível	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Óleo lubrificante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custo Total Energia	0											
Conjunto de força	121.919	255.294	283.905	247.903	121.919	255.294	283.905	247.903	121.919	255.294	283.905	247.903
Biela	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808	10.808
Turbo	29.469	32.879	29.469	32.879	29.469	32.879	29.469	32.879	29.469	32.879	29.469	32.879
Virabrequim	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654
Bloco	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654	47.654
Eixo de comando	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187	2.187
Engrenagens	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362	2.362
Bomba de óleo	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518
Bomba d'água	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080
Bomba injetora	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347
Governador	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934	5.934
Outros	2.740	2.740	2.740	2.740	2.740	2.740	2.740	2.740	2.740	2.740	2.740	2.740
Oportunidade MD	479	479	479	479	479	479	479	479	479	479	479	479
Oportunidade Sobressalentes	677	677	677	677	677	677	677	677	677	677	677	677
Custo Oportunidade Locomotiva	280.827	417.613	442.814	410.222	280.827	417.613	442.814	410.222	280.827	417.613	442.814	410.222
Total Oportunidade Locomotiva	280.827	417.613	442.814	410.222	280.827	417.613	442.814	410.222	280.827	417.613	442.814	410.222

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores em reais e centavos suprimidos para melhor visualização

Tabela C-11 – Custos de oportunidade por trem parado. Detalhado por componente em todo o ciclo do motor diesel da alternativa 3.

	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Óleo combustível	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Óleo lubrificante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custo Total Energia	0											
Conjunto de força	9.557	20.012	22.255	19.433	9.557	20.012	22.255	19.433	9.557	20.012	22.255	19.433
Biela	862	862	862	862	862	862	862	862	862	862	862	862
Turbo	3.663	4.087	3.663	4.087	3.663	4.087	3.663	4.087	3.663	4.087	3.663	4.087
Virabrequim	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604
Bloco	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604	1.604
Eixo de comando	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294
Engrenagens	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572
Bomba de óleo	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758
Bomba d'água	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465
Bomba injetora	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479
Governador	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641	1.641
Outros	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327	2.327
Custo Oportunidade Trem	27.824	38.703	40.522	38.124	27.824	38.703	40.522	38.124	27.824	38.703	40.522	38.124
Total Oportunidade Trem	27.824	38.703	40.522	38.124	27.824	38.703	40.522	38.124	27.824	38.703	40.522	38.124

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores em reais e centavos suprimidos para melhor visualização

APÊNDICE D

Esse apêndice apresenta o detalhamento dos cálculos para o resultado financeiro da alternativa 4 do LCC do Motor diesel ferroviário.

A tabela D-1 apresenta o número de falhas esperado para os conjuntos de força utilizados no estudo da alternativa 4. A coluna N contém quantos conjuntos foram instalados no ano em questão, e cada coluna representa a parcela dos componentes que terão falhado até o fim do ano corrente baseando-se na probabilidade de falha para o ano em operação como consta na tabela 12.

Tabela D-1 – Número de falhas esperado por ano para conjuntos de força da alternativa 4.

CONJUNTO DE FORÇA	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1º ANO	16	0,02	0,17	1,22	2,02	2,73	3,04	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,02	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
3º ANO	0,17	-	-	0,00	0,00	0,01	0,02	-	-	-	-	-	-
4º ANO	1,22	-	-	-	0,00	0,01	0,09	-	-	-	-	-	-
5º ANO	2,03	-	-	-	-	0,00	0,02	-	-	-	-	-	-
6º ANO	2,76	-	-	-	-	-	0,00	-	-	-	-	-	-
7º ANO	16,00	-	-	-	-	-	-	0,02	0,17	1,22	2,02	2,73	3,04
8º ANO	0,02	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9º ANO	0,17	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,01	0,02
10º ANO	1,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,01	0,09
11º ANO	2,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,02
12º ANO	2,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00
TOTAL	-	0,02	0,17	1,22	2,03	2,76	3,18	0,02	0,17	1,22	2,03	2,76	3,18

Fonte: Autoria própria

Durante uma manutenção corretiva, há dois custos associados a cada uma delas: custo da peça e custo da mão de obra necessária para trocar a peça. Assim, o custo anual por manutenção corretiva é:

$$\text{Custo MC} = N^{\circ} \text{ Falhas} * (\text{Custo Peça} + \text{Custo M. O.})$$

Equação D-1 – Equação básica do custo de cada manutenção corretiva.

Tabela D-2 – Custo direto no orçamento causa de manutenção corretiva devido ao número de falhas do conjunto de força esperado da tabela D-1.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	16,00	240	2.421	17.918	29.658	40.017	44.605	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,02	-	0	2	18	30	41	-	-	-	-	-	-
3º ANO	0,17	-	-	2	25	185	306	-	-	-	-	-	-
4º ANO	1,22	-	-	-	18	185	1.385	-	-	-	-	-	-
5º ANO	2,03	-	-	-	-	30	307	-	-	-	-	-	-
6º ANO	2,76	-	-	-	-	-	41	-	-	-	-	-	-
7º ANO	16,00	-	-	-	-	-	-	240	2.421	17.918	29.658	40.017	44.605
8º ANO	0,02	-	-	-	-	-	-	-	0	2	18	30	41
9º ANO	0,17	-	-	-	-	-	-	-	-	2	25	185	306
10º ANO	1,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18	185	1.369
11º ANO	2,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	307
12º ANO	2,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41
Total	-	240	2.421	17.923	29.719	40.447	46.685	240	2.421	17.923	29.719	40.447	46.669

Fonte: Autoria própria.

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Para estimar o custo de oportunidade por locomotiva parada realizando manutenção, utiliza-se do tempo médio entre reparos de cada componente, como na equação D-2.

$$\text{Custo Oportunidade Loco Parada} = N^{\circ} \text{Falhas} * \text{Custo Hora Locomotiva Parada} * \text{MTTR}$$

Equação D-2 – Equação básica do custo de oportunidade da locomotiva parada.

Esse custo da hora de locomotiva parada é de 619,17 reais. Os custos estão detalhados ano a ano na tabela D-3.

Tabela D-3 – Custo de oportunidade por locomotiva parada devido ao número de falhas esperado da tabela D-1.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	16,00	609	6.149	45.519	75.345	101.661	113.318	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,02	-	1	6	47	77	104	-	-	-	-	-	-
3º ANO	0,17	-	-	6	63	470	778	-	-	-	-	-	-
4º ANO	1,22	-	-	-	47	470	3.518	-	-	-	-	-	-
5º ANO	2,03	-	-	-	-	77	779	-	-	-	-	-	-
6º ANO	2,76	-	-	-	-	-	105	-	-	-	-	-	-
7º ANO	16,00	-	-	-	-	-	-	609	6.149	45.519	75.345	101.661	113.318
8º ANO	0,02	-	-	-	-	-	-	-	1	6	47	77	104
9º ANO	0,17	-	-	-	-	-	-	-	-	6	63	470	778
10º ANO	1,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47	470	3.478
11º ANO	2,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	77	779
12º ANO	2,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	105
Total	-	609	6.150	45.532	75.501	102.755	118.602	609	6.150	45.532	75.501	102.755	118.562

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Já o custo de oportunidade por trem parado é estimado da mesma forma que a locomotiva parada, mas utilizando o custo de oportunidade por trem parado, mas tem uma nova variável, a relação de impacto/trocas, ou seja, qual a porcentagem de falhas que dão impacto no trecho e o trem para, explanado na equação D-3.

$$\text{Custo Oportunidade Trem Parado} = N^{\circ} \text{Falhas} * \text{Custo Hora Trem Parado} * \text{Relação Impacto/Troca}$$

Equação D-3 – Equação básica do custo de oportunidade do trem parado.

O custo estimado do trem parado é de 22.966,29. Os custos são mostrados na tabela D-4.

Tabela D-4 – Custo de oportunidade por trem parado devido ao número de falhas esperado da tabela D-1.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	0,02	63	631	4.671	7.732	10.433	11.629	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,17	-	0	1	5	8	11	-	-	-	-	-	-
3º ANO	1,22	-	-	1	7	48	80	-	-	-	-	-	-
4º ANO	2,03	-	-	-	5	48	361	-	-	-	-	-	-
5º ANO	2,76	-	-	-	-	8	80	-	-	-	-	-	-
6º ANO	16,00	-	-	-	-	-	11	-	-	-	-	-	-
7º ANO	0,02	-	-	-	-	-	-	63	631	4.671	7.732	10.433	11.629
8º ANO	0,17	-	-	-	-	-	-	-	0	1	5	8	11
9º ANO	1,22	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7	48	80
10º ANO	2,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	48	357
11º ANO	2,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	80
12º ANO	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11
Total	-	63	631	4.673	7.748	10.545	12.171	63	631	4.673	7.748	10.545	12.167

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Os custos do turbo tem os mesmos princípios de cálculo que o do conjunto de força. Na tabela D-5, está o número de falhas esperado para o turbo durante os 12 anos do estudo.

Tabela D-5 – Número de falhas esperado por ano para turbos da alternativa 4.

TURBO	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1º ANO	1	0,01	0,11	0,41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,01	-	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3º ANO	0,11	-	-	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4º ANO	1,00	-	-	-	0,01	0,11	0,41	-	-	-	-	-	-
5º ANO	0,01	-	-	-	-	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
6º ANO	0,11	-	-	-	-	-	0,00	-	-	-	-	-	-
7º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	0,01	0,11	0,41	-	-	-
8º ANO	0,01	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	-	-	-
9º ANO	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	-	-	-
10º ANO	0,41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,05	0,17
11º ANO	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00
12º ANO	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00
Total	-	0,01	0,11	0,41	0,01	0,11	0,41	0,01	0,11	0,41	0,00	0,05	0,17

Fonte: Autoria própria

O custo de manutenção corretiva do turbo se segue na tabela D-6, o custo de oportunidade por locomotiva parada causa turbo está na tabela D-7. Na tabela D-8 está o custo de oportunidade por trem parado por causa de falha de turbo.

		(conclusão)											
	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
8º ANO	0,01	-	-	-	-	-	-	-	3	54	-	-	-
9º ANO	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	54	-	-	-
10º ANO	0,41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	196	3.705	13.451
11º ANO	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	22
12º ANO	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22
Total	-	472	8.942	32.557	472	8.942	32.557	472	8.942	32.557	196	3.707	13.496

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Tabela D-8 – Custo de oportunidade por trem parado devido ao número de falhas esperado de turbo da tabela D-3.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	1,00	59	1.111	4.033	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,01	-	0	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3º ANO	0,11	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4º ANO	1,00	-	-	-	59	1.111	4.033	-	-	-	-	-	-
5º ANO	0,01	-	-	-	-	0	7	-	-	-	-	-	-
6º ANO	0,11	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-
7º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	59	1.111	4.033	-	-	-
8º ANO	0,01	-	-	-	-	-	-	-	0	7	-	-	-
9º ANO	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-
10º ANO	0,41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24	461	1.672
11º ANO	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	3
12º ANO	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Total	-	59	1.111	4.047	59	1.111	4.047	59	1.111	4.047	24	461	1.677

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Tabela D-9 – Custo detalhados de gastos em manutenção corretiva por componente em todo o ciclo do motor diesel da alternativa 4.

	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Óleo combustível	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578	578.578
Óleo lubrificante	16.817	16.817	16.817	16.817	16.817	16.817	16.817	16.817	16.817	16.817	16.817	16.817
Custo Total Energia	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395	595.395
Conjunto de força	240	2.421	17.923	29.719	40.447	46.685	240	2.421	17.923	29.719	40.447	46.669
Biela	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255
Turbo	257	4.862	17.703	257	4.862	17.703	257	4.862	17.703	106	2.015	7.338
Virabrequim	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545
Bloco	599	599	599	599	599	599	599	599	599	599	599	599
Eixo de comando	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
Engrenagens	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
Bomba de óleo	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372
Bomba d'água	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137
Bomba injetora	4.416	4.416	4.416	4.416	4.416	4.416	4.416	4.416	4.416	4.416	4.416	4.416
Governador	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968
Outros	296	296	296	296	296	296	296	296	296	296	296	296
Estoque e Produção	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548
Peças sobressalentes	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396
Custo Peças MC	28.259	35.045	63.388	57.739	73.072	92.150	28.259	35.045	63.388	57.588	70.225	81.770
Custo Peças Prevent.	445.000	0	0	74.425	0	0	415.274	0	74.425	0	0	0
Total Orçamento	1.068.654	630.440	658.783	727.559	668.467	687.545	1.038.928	630.440	658.783	727.408	665.620	677.165

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores em reais e centavos suprimidos para melhor visualização

Tabela D-10 – Custos de oportunidade por locomotiva parado. Detalhado por componente em todo o ciclo do motor diesel da alternativa 4.

	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Óleo combustível	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Óleo lubrificante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custo Total Energia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Conjunto de força	609	6.150	45.532	75.501	102.755	118.602	609	6.150	45.532	75.501	102.755	118.562
Biela	7.950	7.950	7.950	7.950	7.950	7.950	7.950	7.950	7.950	7.950	7.950	7.950
Turbo	472	8.942	32.557	472	8.942	32.557	472	8.942	32.557	196	3.707	13.496
Virabrequim	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969
Bloco	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128
Eixo de comando	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373
Engrenagens	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593
Bomba de óleo	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518
Bomba d'água	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080
Bomba injetora	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347	2.347
Governador	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512
Outros	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255
Oportunidade MD	479	479	479	479	479	479	479	479	479	479	479	479
Oportunidade Sobressalentes	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248
Custo Oportunidade Locomotiva	82.533	96.544	159.541	157.425	193.149	232.611	82.533	96.544	159.541	157.149	187.913	213.510
Total Oportunidade Locomotiva	82.533	96.544	159.541	157.425	193.149	232.611	82.533	96.544	159.541	157.149	187.913	213.510

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores em reais e centavos suprimidos para melhor visualização

Tabela D-11 – Custos de oportunidade por trem parado. Detalhado por componente em todo o ciclo do motor diesel da alternativa 4.

	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Óleo combustível	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Óleo lubrificante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custo Total Energia	0											
Conjunto de força	63	631	4.673	7.748	10.545	12.171	63	631	4.673	7.748	10.545	12.167
Biela	634	634	634	634	634	634	634	634	634	634	634	634
Turbo	59	1.111	4.047	59	1.111	4.047	59	1.111	4.047	24	461	1.677
Virabrequim	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109
Bloco	711	711	711	711	711	711	711	711	711	711	711	711
Eixo de comando	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184
Engrenagens	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060
Bomba de óleo	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758
Bomba d'água	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465
Bomba injetora	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479	3.479
Governador	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971
Outros	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916
Custo Oportunidade Trem	11.409	13.030	20.007	19.094	22.944	27.505	11.409	13.030	20.007	19.060	22.293	25.132
Total Oportunidade Trem	11.409	13.030	20.007	19.094	22.944	27.505	11.409	13.030	20.007	19.060	22.293	25.132

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores em reais e centavos suprimidos para melhor visualização

APÊNDICE E

Esse apêndice apresenta o detalhamento dos cálculos para o resultado financeiro da alternativa 5 do LCC do Motor diesel ferroviário.

A tabela E-1 apresenta o número de falhas esperado para os conjuntos de força utilizados no estudo da alternativa 5. A coluna N contém quantos conjuntos foram instalados no ano em questão, e cada coluna representa a parcela dos componentes que terão falhado até o fim do ano corrente baseando-se na probabilidade de falha para o ano em operação como consta na tabela 12.

Tabela E-1 – Número de falhas esperado por ano para conjuntos de força da alternativa 5.

CONJUNTO DE FORÇA	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1º ANO	16	0,02	0,17	1,22	2,02	2,73	3,04	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,02	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
3º ANO	0,17	-	-	0,00	0,00	0,01	0,02	-	-	-	-	-	-
4º ANO	1,22	-	-	-	0,00	0,01	0,09	-	-	-	-	-	-
5º ANO	2,03	-	-	-	-	0,00	0,02	-	-	-	-	-	-
6º ANO	2,76	-	-	-	-	-	0,00	-	-	-	-	-	-
7º ANO	16,00	-	-	-	-	-	-	0,02	0,17	1,22	2,02	2,73	3,04
8º ANO	0,02	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9º ANO	0,17	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,01	0,02
10º ANO	1,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,01	0,09
11º ANO	2,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,02
12º ANO	2,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00
TOTAL	-	0,02	0,17	1,22	2,03	2,76	3,18	0,02	0,17	1,22	2,03	2,76	3,18

Fonte: Autoria própria

Durante uma manutenção corretiva, há dois custos associados a cada uma delas: custo da peça e custo da mão de obra necessária para trocar a peça. Assim, o custo anual por manutenção corretiva é:

$$\text{Custo MC} = N^{\circ} \text{ Falhas} * (\text{Custo Peça} + \text{Custo M. O.})$$

Equação E-1 – Equação básica do custo de cada manutenção corretiva.

Tabela E-2 – Custo direto no orçamento causa de manutenção corretiva devido ao número de falhas do conjunto de força esperado da tabela E-1.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	16,00	240	2.421	17.918	29.658	40.017	44.605	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,02	-	0	2	18	30	41	-	-	-	-	-	-
3º ANO	0,17	-	-	2	25	185	306	-	-	-	-	-	-
4º ANO	1,22	-	-	-	18	185	1.385	-	-	-	-	-	-
5º ANO	2,03	-	-	-	-	30	307	-	-	-	-	-	-
6º ANO	2,76	-	-	-	-	-	41	-	-	-	-	-	-
7º ANO	16,00	-	-	-	-	-	-	240	2.421	17.918	29.658	40.017	44.605
8º ANO	0,02	-	-	-	-	-	-	-	0	2	18	30	41
9º ANO	0,17	-	-	-	-	-	-	-	-	2	25	185	306
10º ANO	1,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18	185	1.369
11º ANO	2,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	307
12º ANO	2,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41
Total	-	240	2.421	17.923	29.719	40.447	46.685	240	2.421	17.923	29.719	40.447	46.669

Fonte: Autoria própria.

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Para estimar o custo de oportunidade por locomotiva parada realizando manutenção, utiliza-se do tempo médio entre reparos de cada componente, como na equação E-2.

$$\text{Custo Oportunidade Loco Parada} = N^{\circ} \text{Falhas} * \text{Custo Hora Locomotiva Parada} * \text{MTTR}$$

Equação E-2 – Equação básica do custo de oportunidade da locomotiva parada.

Esse custo da hora de locomotiva parada é de 619,17 reais. Os custos estão detalhados ano a ano na tabela E-3.

Tabela E-3 – Custo de oportunidade por locomotiva parada devido ao número de falhas esperado da tabela E-1.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	16,00	609	6.149	45.519	75.345	101.661	113.318	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,02	-	1	6	47	77	104	-	-	-	-	-	-
3º ANO	0,17	-	-	6	63	470	778	-	-	-	-	-	-
4º ANO	1,22	-	-	-	47	470	3.518	-	-	-	-	-	-
5º ANO	2,03	-	-	-	-	77	779	-	-	-	-	-	-
6º ANO	2,76	-	-	-	-	-	105	-	-	-	-	-	-
7º ANO	16,00	-	-	-	-	-	-	609	6.149	45.519	75.345	101.661	113.318
8º ANO	0,02	-	-	-	-	-	-	-	1	6	47	77	104
9º ANO	0,17	-	-	-	-	-	-	-	-	6	63	470	778
10º ANO	1,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47	470	3.478
11º ANO	2,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	77	779
12º ANO	2,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	105
Total	-	609	6.150	45.532	75.501	102.755	118.602	609	6.150	45.532	75.501	102.755	118.562

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Já o custo de oportunidade por trem parado é estimado da mesma forma que a locomotiva parada, mas utilizando o custo de oportunidade por trem parado, mas tem uma nova variável, a relação de impacto/trocas, ou seja, qual a porcentagem de falhas que dão impacto no trecho e o trem para, explanado na equação E-3.

$$\text{Custo Oportunidade Trem Parado} = N^{\circ} \text{Falhas} * \text{Custo Hora Trem Parado} * \text{Relação Impacto/Troca}$$

Equação E-3 – Equação básica do custo de oportunidade do trem parado.

O custo estimado do trem parado é de 22.966,29. Os custos são mostrados na tabela E-4.

Tabela E-4 – Custo de oportunidade por trem parado devido ao número de falhas esperado da tabela E-1.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	0,02	63	631	4.671	7.732	10.433	11.629	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,17	-	0	1	5	8	11	-	-	-	-	-	-
3º ANO	1,22	-	-	1	7	48	80	-	-	-	-	-	-
4º ANO	2,03	-	-	-	5	48	361	-	-	-	-	-	-
5º ANO	2,76	-	-	-	-	8	80	-	-	-	-	-	-
6º ANO	16,00	-	-	-	-	-	11	-	-	-	-	-	-
7º ANO	0,02	-	-	-	-	-	-	63	631	4.671	7.732	10.433	11.629
8º ANO	0,17	-	-	-	-	-	-	-	0	1	5	8	11
9º ANO	1,22	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7	48	80
10º ANO	2,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	48	357
11º ANO	2,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	80
12º ANO	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11
Total	-	63	631	4.673	7.748	10.545	12.171	63	631	4.673	7.748	10.545	12.167

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Os custos do turbo tem os mesmos princípios de cálculo que o do conjunto de força. Na tabela E-5, está o número de falhas esperado para o turbo durante os 12 anos do estudo.

Tabela E-5 – Número de falhas esperado por ano para turbos da alternativa 5.

TURBO	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1º ANO	1	0,02	0,06	0,11	0,16	0,21	0,26	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,02	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
3º ANO	0,06	-	-	0,00	0,00	0,01	0,01	-	-	-	-	-	-
4º ANO	0,11	-	-	-	0,00	0,01	0,01	-	-	-	-	-	-
5º ANO	0,17	-	-	-	-	0,00	0,01	-	-	-	-	-	-
6º ANO	0,23	-	-	-	-	-	0,00	-	-	-	-	-	-
7º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	0,02	0,06	0,10	-	-	-
8º ANO	0,02	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	-	-	-
9º ANO	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	-	-	-
10º ANO	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,01	0,01
11º ANO	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00
12º ANO	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00
Total	-	0,02	0,06	0,11	0,17	0,23	0,29	0,02	0,06	0,10	0,00	0,01	0,01

Fonte: Autoria própria

O custo de manutenção corretiva do turbo se segue na tabela E-6, o custo de oportunidade por locomotiva parada causa turbo está na tabela E-7. Na tabela E-8 está o custo de oportunidade por trem parado por causa de falha de turbo.

Tabela E-6 – Custo direto no orçamento por causa de manutenção corretiva devido ao número de falhas de turbo esperado da tabela E-3.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	1,00	707	2.555	4.655	6.837	9.032	11.056	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,02	-	12	42	71	93	103	-	-	-	-	-	-
3º ANO	0,06	-	-	42	151	259	339	-	-	-	-	-	-
4º ANO	0,11	-	-	-	78	279	478	-	-	-	-	-	-
5º ANO	0,17	-	-	-	-	118	420	-	-	-	-	-	-
6º ANO	0,23	-	-	-	-	-	162	-	-	-	-	-	-
7º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	707	2.513	4.304	-	-	-
8º ANO	0,02	-	-	-	-	-	-	-	12	42	-	-	-
9º ANO	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	42	-	-	-
10º ANO	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	73	258	442
11º ANO	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	4
12º ANO	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4
Total	-	707	2.567	4.739	7.138	9.781	12.558	707	2.524	4.387	73	259	451

Fonte: Autoria própria.

Nota: Valores em reais.

Tabela E-7 – Custo de oportunidade por locomotiva parada devido ao número de falhas de turbo esperado da tabela E-3.

(continua)

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	1,00	1.300	4.699	8.561	12.575	16.612	20.334	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,02	-	22	76	131	171	190	-	-	-	-	-	-
3º ANO	0,06	-	-	78	278	476	623	-	-	-	-	-	-
4º ANO	0,11	-	-	-	144	513	878	-	-	-	-	-	-
5º ANO	0,17	-	-	-	-	217	772	-	-	-	-	-	-
6º ANO	0,23	-	-	-	-	-	298	-	-	-	-	-	-
7º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	1.300	4.621	7.916	-	-	-

		(conclusão)											
	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
8º ANO	0,02	-	-	-	-	-	-	-	22	76	-	-	-
9º ANO	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	77	-	-	-
10º ANO	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	134	475	813
11º ANO	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	8
12º ANO	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8
Total	-	1.300	4.720	8.716	13.127	17.989	23.096	1.300	4.643	8.069	134	477	829

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Tabela E-8 – Custo de oportunidade por trem parado devido ao número de falhas esperado de turbo da tabela E-3.

	N	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
1º ANO	1,00	162	584	1.064	1.563	2.065	2.527	-	-	-	-	-	-
2º ANO	0,02	-	3	10	16	21	24	-	-	-	-	-	-
3º ANO	0,06	-	-	10	35	59	77	-	-	-	-	-	-
4º ANO	0,11	-	-	-	18	64	109	-	-	-	-	-	-
5º ANO	0,17	-	-	-	-	27	96	-	-	-	-	-	-
6º ANO	0,23	-	-	-	-	-	37	-	-	-	-	-	-
7º ANO	1,00	-	-	-	-	-	-	162	574	984	-	-	-
8º ANO	0,02	-	-	-	-	-	-	-	3	10	-	-	-
9º ANO	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-
10º ANO	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17	59	101
11º ANO	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	1
12º ANO	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Total	-	162	587	1.083	1.632	2.236	2.871	162	577	1.003	17	59	103

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais e centavos suprimidos para melhor visualização.

Tabela E-9 – Custo detalhados de gastos em manutenção corretiva por componente em todo o ciclo do motor diesel da alternativa 5.

	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Óleo combustível	549.649	549.649	549.649	549.649	549.649	549.649	549.649	549.649	549.649	549.649	549.649	549.649
Óleo lubrificante	5.606	5.606	5.606	5.606	5.606	5.606	5.606	5.606	5.606	5.606	5.606	5.606
Custo Total Energia	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254	555.254
Conjunto de força	240	2.421	17.923	29.719	40.447	46.685	240	2.421	17.923	29.719	40.447	46.669
Biela	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255	3.255
Turbo	707	2.567	4.739	7.138	9.781	12.558	707	2.524	4.387	73	259	451
Virabrequim	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545	5.545
Bloco	599	599	599	599	599	599	599	599	599	599	599	599
Eixo de comando	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
Engrenagens	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
Bomba de óleo	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372	372
Bomba d'água	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137
Bomba injetora	2.810	2.810	2.810	2.810	2.810	2.810	2.810	2.810	2.810	2.810	2.810	2.810
Governador	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968	968
Outros	296	296	296	296	296	296	296	296	296	296	296	296
Estoque e Produção	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548	1.548
Peças sobressalentes	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396	10.396
Custo Peças MC	27.103	31.144	48.818	63.014	76.385	85.400	27.103	31.102	48.467	55.949	66.863	73.277
Custo Peças Prevent.	1.745.868	0	0	31.925	0	0	415.274	0	31.925	0	0	0
Total Orçamento	2.328.226	586.399	604.073	650.193	631.640	640.654	997.632	586.356	603.721	643.128	622.118	628.531

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores em reais e centavos suprimidos para melhor visualização

Tabela E-10 – Custos de oportunidade por locomotiva parado. Detalhado por componente em todo o ciclo do motor diesel da alternativa 5.

	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Óleo combustível	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Óleo lubrificante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custo Total Energia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Conjunto de força	609	6.150	45.532	75.501	102.755	118.602	609	6.150	45.532	75.501	102.755	118.562
Biela	284	284	284	284	284	284	284	284	7.950	7.950	7.950	7.950
Turbo	1.300	4.720	8.716	13.127	17.989	23.096	1.300	4.643	8.069	134	477	829
Virabrequim	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969	32.969
Bloco	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128	21.128
Eixo de comando	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373	1.373
Engrenagens	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593
Bomba de óleo	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518	3.518
Bomba d'água	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080	3.080
Bomba injetora	1.494	1.494	1.494	1.494	1.494	1.494	1.494	1.494	1.494	1.494	1.494	1.494
Governador	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512
Outros	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255	2.255
Oportunidade MD	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879	1.879
Oportunidade Sobressalentes	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248
Custo Oportunidade Locomotiva	76.241	85.202	128.579	162.961	195.076	216.029	76.241	85.124	135.599	157.633	185.230	201.389
Total Oportunidade Locomotiva	76.241	85.202	128.579	162.961	195.076	216.029	76.241	85.124	135.599	157.633	185.230	201.389

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores em reais e centavos suprimidos para melhor visualização

Tabela E-11 – Custos de oportunidade por trem parado. Detalhado por componente em todo o ciclo do motor diesel da alternativa 5.

	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Óleo combustível	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Óleo lubrificante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custo Total Energia	0											
Conjunto de força	63	631	4.673	7.748	10.545	12.171	63	631	4.673	7.748	10.545	12.167
Biela	634	634	634	634	634	634	634	634	634	634	634	634
Turbo	162	587	1.083	1.632	2.236	2.871	162	577	1.003	17	59	103
Virabrequim	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109	1.109
Bloco	711	711	711	711	711	711	711	711	711	711	711	711
Eixo de comando	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184	184
Engrenagens	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060	1.060
Bomba de óleo	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758	758
Bomba d'água	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465
Bomba injetora	2.214	2.214	2.214	2.214	2.214	2.214	2.214	2.214	2.214	2.214	2.214	2.214
Governador	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971
Outros	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916
Custo Oportunidade Trem	10.246	11.240	15.778	19.402	22.803	25.064	10.246	11.230	15.698	17.787	20.626	22.292
Total Oportunidade Trem	10.246	11.240	15.778	19.402	22.803	25.064	10.246	11.230	15.698	17.787	20.626	22.292

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores em reais e centavos suprimidos para melhor visualização

APÊNDICE F

Esse apêndice apresenta o detalhamento dos cálculos para o cálculo do valor presente líquido (VPL) das 5 estratégias alternativas do custo de ciclo de vida do motor diesel ferroviário, como explicado na seção 4.6.

Na tabela F-1, consta o cálculo do VPL para a alternativa 1 a partir dos valores da tabela 17. Nesse caso não há depreciação e nem investimento em manutenção preventiva, a taxa de desconto é de 8% ao ano.

Tabela F-1 – Cálculo contábil do valor presente líquido (VPL) para a alternativa 1.

ALTERNATIVA 1	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custo Manut. e Operação	1.068.430	1.297.402	1.346.104	1.287.037	1.300.464	1.307.698	1.301.915	1.302.815	1.303.648	1.303.120	1.303.163	1.303.255
Depreciação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lucro antes de IR	(1.068.430)	(1.297.402)	(1.346.104)	(1.287.037)	(1.300.464)	(1.307.698)	(1.301.915)	(1.302.815)	(1.303.648)	(1.303.120)	(1.303.163)	(1.303.255)
Imposto de Renda	363.266	441.117	457.675	437.593	442.158	444.617	442.651	442.957	443.240	443.061	443.076	443.107
Lucro líquido	(705.164)	(856.286)	(888.429)	(849.444)	(858.306)	(863.081)	(859.264)	(859.858)	(860.408)	(860.059)	(860.088)	(860.148)
Adicionar depreciação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fluxo de caixa	(705.164)	(856.286)	(888.429)	(849.444)	(858.306)	(863.081)	(859.264)	(859.858)	(860.408)	(860.059)	(860.088)	(860.148)
Fator de desconto	1,08	1,17	1,26	1,36	1,47	1,59	1,71	1,85	2,00	2,16	2,33	2,52
Valor Presente	(652.929)	(734.127)	(705.263)	(624.367)	(584.149)	(543.887)	(501.372)	(464.554)	(430.418)	(398.374)	(368.877)	(341.577)

TOTAL VPL CICLO	R\$ (6.349.894,89)
-----------------	--------------------

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais, centavos suprimidos para melhor visualização. Números entre parênteses representam valores negativos.

Na tabela F-2, consta o cálculo do VPL para a alternativa 2 a partir dos valores da tabela 17. Nesse caso não há depreciação e nem investimento em manutenção preventiva, a taxa de desconto é de 8% ao ano.

Tabela F-2 – Cálculo contábil do valor presente líquido (VPL) para a alternativa 2.

ALTERNATIVA 2	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custo Manut. e Operação	1.193.737	1.148.908	1.159.065	1.164.542	1.160.158	1.160.840	1.161.471	1.161.070	1.161.104	1.161.167	1.193.737	1.148.908
Depreciação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lucro antes de IR	(1.193.737)	(1.148.908)	(1.159.065)	(1.164.542)	(1.160.158)	(1.160.840)	(1.161.471)	(1.161.070)	(1.161.104)	(1.161.167)	(1.193.737)	(1.148.908)
Imposto de Renda	405.871	390.629	394.082	395.944	394.454	394.685	394.900	394.764	394.775	394.797	405.871	390.629
Lucro líquido	(787.867)	(758.279)	(764.983)	(768.598)	(765.704)	(766.154)	(766.571)	(766.306)	(766.328)	(766.370)	(787.867)	(758.279)
Adicionar depreciação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fluxo de caixa	(787.867)	(758.279)	(764.983)	(768.598)	(765.704)	(766.154)	(766.571)	(766.306)	(766.328)	(766.370)	(787.867)	(758.279)
Fator de desconto	1,26	1,36	1,47	1,59	1,71	1,85	2,00	2,16	2,33	2,52	1,26	1,36
Valor Presente	(625.434)	(557.358)	(520.635)	(484.347)	(446.781)	(413.929)	(383.476)	(354.948)	(328.665)	(304.336)	(625.434)	(557.358)

TOTAL VPL CICLO	R\$ (5.676.460,39)
-----------------	--------------------

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais, centavos suprimidos para melhor visualização. Números entre parênteses representam valores negativos.

Na tabela F-3, consta o cálculo do VPL para a alternativa 3 a partir dos valores da tabela 17. Nesse caso há depreciação linear das peças que sofrem manutenção preventiva, a taxa de desconto é de 8% ao ano. A manutenção preventiva não entra contabilmente como resultado operacional e por isso não sofre abatimento do imposto de renda e CSLL.

Tabela F-3 – Cálculo contábil do valor presente líquido (VPL) para a alternativa 3.

ALTERNATIVA 3	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custo Manut. e Operação	961.966	1.130.945	1.160.867	1.121.870	961.966	1.130.945	1.160.867	1.121.870	961.966	1.130.945	1.160.867	1.121.870
Depreciação	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881
Lucro antes de IR	(1.009.847)	(1.130.945)	(1.160.867)	(1.121.870)	(961.966)	(1.130.945)	(1.160.867)	(1.121.870)	(961.966)	(1.130.945)	(1.160.867)	(1.121.870)
Imposto de Renda	343.348	384.521	394.695	381.436	327.068	384.521	394.695	381.436	327.068	384.521	394.695	381.436
Lucro líquido	(666.499)	(746.424)	(766.172)	(740.434)	(634.897)	(746.424)	(766.172)	(740.434)	(634.897)	(746.424)	(766.172)	(740.434)
Adicionar depreciação	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881	47.881
Fluxo de caixa	(618.618)	(698.543)	(718.291)	(692.553)	(587.016)	(698.543)	(718.291)	(692.553)	(587.016)	(698.543)	(718.291)	(692.553)
Invest. Preventiva	(158.178)	0	(33.345)	0	(158.178)	0	(33.345)	0	(158.178)	0	(33.345)	0
Fator de desconto	1,08	1,17	1,26	1,36	1,47	1,59	1,71	1,85	2,00	2,16	2,33	2,52
Valor Presente	(719.256)	(598.888)	(596.674)	(509.047)	(507.167)	(440.201)	(438.573)	(374.165)	(372.783)	(323.561)	(322.364)	(275.022)

TOTAL VPL CICLO	R\$ (5.477.700,30)
-----------------	--------------------

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais, centavos suprimidos para melhor visualização. Números entre parênteses representam valores negativos.

Na tabela F-4, consta o cálculo do VPL para a alternativa 4 a partir dos valores da tabela 17. Nesse caso há depreciação linear das peças que sofrem manutenção preventiva, a taxa de desconto é de 8% ao ano. A manutenção preventiva não entra contabilmente como resultado operacional e por isso não sofre abatimento do imposto de renda e CSLL.

Tabela F-4 – Cálculo contábil do valor presente líquido (VPL) para a alternativa 4.

ALTERNATIVA 3	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custo Manut. e Operação	717.596	740.014	838.330	829.653	884.560	947.661	717.596	740.014	838.330	829.192	875.826	915.807
Depreciação	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571
Lucro antes de IR	(804.167)	(826.585)	(924.901)	(916.223)	(971.130)	(1.034.232)	(804.167)	(826.585)	(924.901)	(915.763)	(962.397)	(1.002.377)
Imposto de Renda	273.417	281.039	314.466	311.516	330.184	351.639	273.417	281.039	314.466	311.359	327.215	340.808
Lucro líquido	(530.750)	(545.546)	(610.435)	(604.707)	(640.946)	(682.593)	(530.750)	(545.546)	(610.435)	(604.403)	(635.182)	(661.569)
Adicionar depreciação	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571	86.571
Fluxo de caixa	(444.179)	(458.975)	(523.864)	(518.137)	(554.375)	(596.022)	(444.179)	(458.975)	(523.864)	(517.833)	(548.611)	(574.998)
Invest. Preventiva	(445.000)	0	0	(74.425)	0	0	(415.274)	0	0	(74.425)	0	0
Fator de desconto	1,08	1,17	1,26	1,36	1,47	1,59	1,71	1,85	2,00	2,16	2,33	2,52
Valor Presente	(823.314)	(393.497)	(415.860)	(435.550)	(377.298)	(375.595)	(501.483)	(247.970)	(262.062)	(274.330)	(235.290)	(228.340)

TOTAL VPL CICLO	R\$ (4.570.590,42)
-----------------	--------------------

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais, centavos suprimidos para melhor visualização. Números entre parênteses representam valores negativos.

Na tabela F-5, consta o cálculo do VPL para a alternativa 5 a partir dos valores da tabela 17. Nesse caso há depreciação linear das peças que sofrem manutenção preventiva, a taxa de desconto é de 8% ao ano. A manutenção preventiva não entra contabilmente como resultado operacional e por isso não sofre abatimento do imposto de renda e CSLL.

Tabela F-5 – Cálculo contábil do valor presente líquido (VPL) para a alternativa 5.

ALTERNATIVA 3	1º ANO	2º ANO	3º ANO	4º ANO	5º ANO	6º ANO	7º ANO	8º ANO	9º ANO	10º ANO	11º ANO	12º ANO
Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custo Manut. e Operação	668.845	682.841	748.430	800.631	849.518	881.747	668.845	682.711	755.018	786.623	827.974	852.213
Depreciação	145.489	145.489	145.489	156.131	156.131	156.131	220.022	220.022	220.022	220.022	220.022	220.022
Lucro antes de IR	(814.334)	(828.330)	(893.919)	(956.761)	(1.005.649)	(1.037.878)	(888.867)	(902.733)	(975.040)	(1.006.645)	(1.047.996)	(1.072.235)
Imposto de Renda	276.874	281.632	303.933	325.299	341.921	352.879	302.215	306.929	331.514	342.259	356.319	364.560
Lucro líquido	(537.460)	(546.698)	(589.987)	(631.463)	(663.728)	(684.999)	(586.652)	(595.804)	(643.526)	(664.386)	(691.677)	(707.675)
Adicionar depreciação	145.489	145.489	145.489	156.131	156.131	156.131	220.022	220.022	220.022	220.022	220.022	220.022
Fluxo de caixa	(391.971)	(401.209)	(444.498)	(475.332)	(507.598)	(528.869)	(366.630)	(375.782)	(423.504)	(444.364)	(471.655)	(487.653)
Invest. Preventiva	(1.745.868)	0	0	(31.925)	0	0	(415.274)	0	0	(31.925)	0	0
Fator de desconto	1,08	1,17	1,26	1,36	1,47	1,59	1,71	1,85	2,00	2,16	2,33	2,52
Valor Presente	(1.979.481)	(343.972)	(352.857)	(372.849)	(345.462)	(333.277)	(456.234)	(203.023)	(211.858)	(220.614)	(202.285)	(193.654)

TOTAL VPL CICLO	R\$ (5.215.564,47)
-----------------	--------------------

Fonte: Autoria própria

Nota: Valores expressos em reais, centavos suprimidos para melhor visualização. Números entre parênteses representam valores negativos.