

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

TIAGO VICENTE LEITE

ANÁLISE DE CAUSAS RAÍZES APLICADA A UMA LOCOMOTIVA

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2019

TIAGO VICENTE LEITE

**ANÁLISE DE CAUSAS RAÍZES APLICADA A UMA
LOCOMOTIVA**

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues.

CURITIBA

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Especialização em Engenharia da Confiabilidade



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE CAUSAS RAÍZES APLICADA A UMA LOCOMOTIVA

por

TIAGO VICENTE LEITE

Esta monografia foi apresentada em 04 de novembro de 2019, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Tiago Vicente Leite foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Marcelo Rodrigues, Dr.
Professor Orientador - UTFPR

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Membro Titular da Banca - UTFPR

Prof. Wanderson Stael Paris, MSc.
Membro Titular da Banca - UTFPR

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

Dedico este trabalho a minha família, que me apoiou nos momentos difíceis e nas minhas decisões, pelo entendimento dos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois, sem ele nada é possível.

Aos meus colegas de classe, por esses dias de convivência, de compartilhamento de conhecimento.

Aos professores do curso de Engenharia da Confiabilidade, que dedicaram seu tempo e seu conhecimento para nos enriquecer com seus conhecimentos e experiências.

Em especial a meus pais, a minha esposa Ana Paula e meu filho amado Samuel Soares.

“Se você não consegue explicar algo de forma simples, você não entendeu suficientemente bem”.
(Albert Einstein).

RESUMO

LEITE, TIAGO VICENTE. **Análise de Causas Raízes Aplicada a uma Locomotiva**. 2019. 74p. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

O objetivo principal dessa pesquisa é identificar a principal causa de impacto na disponibilidade do ativo (locomotiva). Para isso é de fundamental importância entender as causas de impacto na disponibilidade do ativo, em função do grande impacto que gera para parada de trens e o conseqüente impacto na produção. Foi utilizado o método de FMEA para identificação e tratativa dos problemas, através das ferramentas de qualidade de “Diagrama de Pareto”, “Matriz de GUT”, “Brainstorming”, “Diagrama de Ishikawa”, “Técnica dos 5 Por que”. O resultado desse trabalho é propor ações que visem reduzir a quantidade de avarias relacionadas a falhas.

Palavras-chave: Análise de Causas Raízes, Locomotiva.

ABSTRACT

LEITE, TIAGO VICENTE. **Root cause analysis applied to a locomotive**. 2019. 74p. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

The main objective of this research is to identify the main cause of impact on asset availability. It is of fundamental importance to understand the causes of impact on asset availability, due to the great impact that it generates to stop trains and the consequent impact on production. The FMEA method was used to identify and deal with the problems through the quality tools of "Pareto Diagram", "GUT matrix", "Brainstorming", "Ishikawa diagram", "5 Why technique". The result of this work is to propose actions to reduce the number of faults related to failures.

Keywords: Root cause analysis, Locomotive.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diagrama simplificado do funcionamento da locomotiva.....	17
Figura 3.1 – Exemplo de diagrama de Ishikawa.....	33
Figura 4.1 – Conjunto motor de tração completo	37
Figura 4.2 – Diagrama de Ishikawa.....	39
Figura 4.3 – Diagrama Ishikawa da especialidade elétrica	41
Figura 4.4 – Diagrama de Ishikawa com análise comparativa	42
Figura 4.5 – Diagrama de Ishikawa após análise comparativa	45
Figura 4.6 – Retorno da GE quanto ao questionamento	61
Figura 4.7 – Dados técnicos escova fornecedor Mersen	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Impactos KMEF e MKBF da locomotiva BB36 entre 2014 e 2015.....	22
Gráfico 2.2 – Taxa impacto KMEF e MKBF locomotiva BB36 por conjunto	23
Gráfico 2.3 – Comparativo impactos KMEF por conjunto entre 2014 e 2015.....	24
Gráfico 2.4 – Comparativo impactos MKBF por conjunto entre 2014 e 2015.....	25
Gráfico 2.5 – Análise de consumo do motor de tração no ano 2015.....	26
Gráfico 3.1 – Exemplo de diagrama de Pareto.....	29
Gráfico 4.1 – Pareto de falhas de motor de tração em 2015 por especialidade	40
Gráfico 4.2 – Corrente média de motores de tração da locomotiva 720 em 2012.....	55
Gráfico 4.3 – Corrente média motores tração locomotiva 728 em 2015	56
Gráfico 4.4 – Corrente média motores tração locomotiva 733 em 2012	56
Gráfico 4.5 – Corrente média motores tração locomotiva 733 em 2015	57
Gráfico 4.6 – Corrente média motores tração locomotiva 7486 em 2013	58
Gráfico 4.7 – Corrente média motores tração locomotiva 7486 em 2015	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Exemplo matriz de GUT	30
Tabela 4.1 – Matriz de GUT das falhas da locomotiva BB36 no ano 2015	35
Tabela 4.2 – Limite corrente para proteção dos motores de tração	46
Tabela 6.1 – Banco de dados Gráfico 2.1	69
Tabela 6.2 – Banco de dados Gráfico 2.2	70
Tabela 6.3 – Banco de dados Gráfico 2.3	71
Tabela 6.4 – Banco de dados Gráfico 2.4	72
Tabela 6.5 – Banco de dados Gráfico 2.5	73
Tabela 6.6 – Banco de dados Gráfico 4.1	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Atribuição das notas em relação à gravidade.....	30
Quadro 3.2 – Atribuição de notas em relação à urgência	31
Quadro 3.3 – Atribuição de notas em relação à tendência.....	31
Quadro 3.4 – Exemplo de aplicação da técnica dos 5PQ	34
Quadro 4.1 – Resultado do Brainstorming	38
Quadro 4.2 – 5 PQ para causa raiz de falha do motor de tração	62

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 4.1 – Motor de tração	36
Fotografia 4.2 – Transdutor de corrente dos motores de tração	46
Fotografia 4.3 – Transdutor de tensão	48
Fotografia 4.4 – Escovas com sinais de aquecimento I	51
Fotografia 4.5 – Escovas com sinais de aquecimento II	51
Fotografia 4.6 – Rabicho com sinais de aquecimento	52
Fotografia 4.7 – Anel de faiscamento com excesso de Flash Over.....	53
Fotografia 4.8 – Anel com arraste de material.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Amperes
Dr.	Doutor
Eng.	Engenheiro
h	Hora
Km	Quilometro
Prof.	Professor

LISTA DE SIGLAS

5PQ	Cinco porquês
CLP	Controlador Lógico Programável
EMD	<i>Electromotive Diesel</i>
GE	<i>General Electric</i>
GP	Gerador Principal
GUT	Gravidade, urgência, tendência
HH	Homem hora
KMEF	Quilometragem média entre falhas
MKBF	Quilometragem média entre reboque
MOhmns	Isolação Mega Ohmns
MP	Microprocessamento
PMU	Preço médio unitário
THO	Trem hora parado
VMC	Velocidade Mínima Contínua

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral.....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
1.3	JUSTIFICATIVA	18
1.4	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	18
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	LOCOMOTIVA BB36	21
2.1	ANÁLISE DO PROBLEMA	21
2.1.1	Análise da base de dados	22
2.1.1.1	Comparativo KMEF/MKBF 2014/2015	23
2.1.1.1.1	<i>Análise substituição de motores de tração</i>	25
2.2	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	26
3	REFERENCIAL TEÓRICO	28
3.1	INDICADORES DE CONFIABILIDADE	28
3.2	DIAGRAMA DE PARETO	29
3.3	MATRIZ DE GUT	29
3.3.1	Gravidade	30
3.3.2	Urgência	31
3.3.3	Tendência.....	31
3.4	BRAINSTORMING	32
3.5	DIAGRAMA DE ISHIKAWA.....	32
3.6	TÉCNICA DOS 5 PORQUÊS	33
3.7	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	34
4	DESENVOLVIMENTO	35
4.1	REALIZAÇÃO BRAINSTORMING.....	37
4.2	REALIZAÇÃO DIAGRAMA ISHIKAWA	38
4.2.1	Estudo Comparativo das Causas	41
4.2.2	Análise Causas Pendentes do Diagrama de Ishikawa	44
4.2.2.1	Controle de Corrente	45
4.2.2.2	Controle de Tensão	47
4.2.2.3	Sujeira	49
4.2.2.4	Isolação Circuitos	49
4.2.2.5	Falha na Inspeção	49
4.2.2.6	Comprimento e inclinação das rampas, Restrição de velocidade	49
4.3	ANÁLISE DOS MOTORES DE TRAÇÃO.....	50
4.3.1	Escovas Sinal de Aquecimento	50
4.3.2	Rabichos das escovas com aquecimento	51
4.3.3	Anéis de fasicamento com excesso de flash over	52
4.3.4	Comutador danificado e escovas curtas.....	53
4.4	ESTUDO COMPARATIVO DE CORRENTE DOS MOTORES DE TRAÇÃO	54
4.5	ESTUDO CONSEQUÊNCIAS ALTA CORRENTE DOS MOTORES DE TRAÇÃO	59
4.6	SÍNTESE DO CAPÍTULO	62
5	CONCLUSÃO	64

5.1	ANÁLISE DE VIABILIDADE ALTERAÇÃO PROJETO MOTOR GE761 ..	65
5.1.1	Benchmarking.....	67
5.2	PROPOSTA PARA NOVOS ESTUDOS.....	67
REFERÊNCIAS.....		68
APÊNDICE A – Banco de dados Gráfico 2.1		69
APÊNDICE B – Banco de dados Gráfico 2.2		70
APÊNDICE C – Banco de dados Gráfico 2.3		71
APÊNDICE D – Banco de dados Gráfico 2.4		72
APÊNDICE E – Banco de dados Gráfico 2.5		73
APÊNDICE F – Banco de dados Gráfico 4.1.....		74

1 INTRODUÇÃO

Será abordado neste capítulo o objetivo do trabalho, premissas, justificativas e análise do problema. O desenvolvimento que será abordado é utilizar-se dos métodos da Engenharia de Confiabilidade para identificar possíveis causas de falha das locomotivas BB36 no corredor Minas/Rio, mediante a identificação das causas propor soluções que visem reduzir o número de avarias.

1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

Nos últimos anos cada vez mais as empresas têm investido em sistemas de segurança, controle e automação, com objetivo de minimizar ou eliminar falhas humanas, minimizar perdas e maximizar os lucros.

Dentro desse contexto tem-se o aumento na utilização de componentes eletrônicos, implementação de novas tecnologias e sistemas cada vez mais confiáveis.

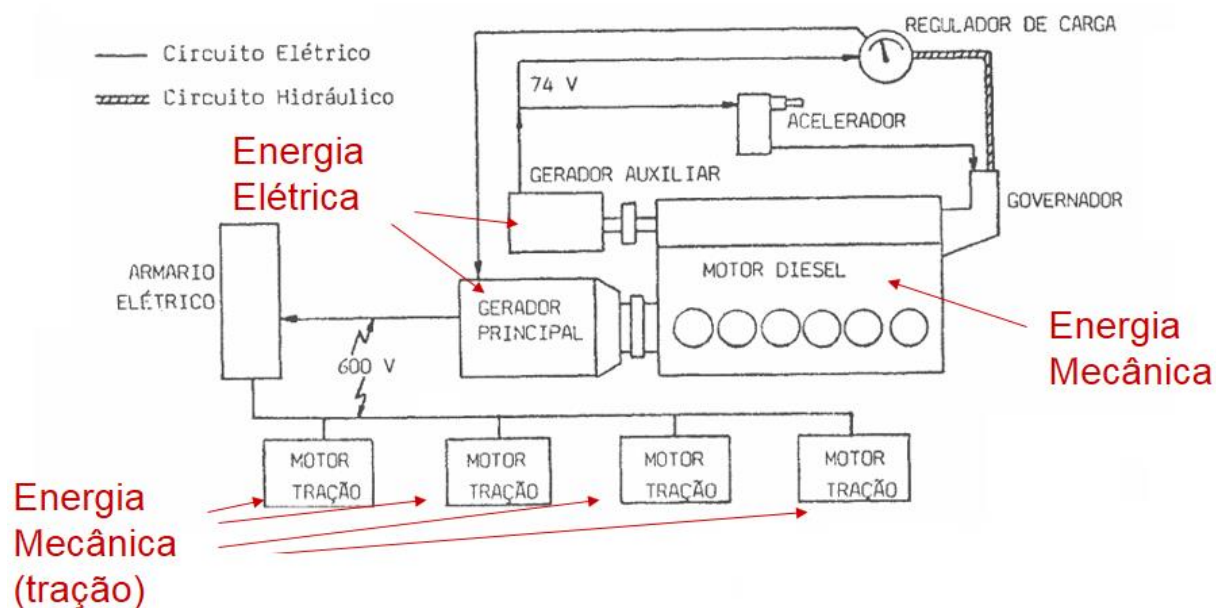
Nas últimas décadas essa “revolução” na difusão da eletrônica também tem atingido as ferrovias de todo o mundo. Locomotivas com sistemas microprocessados (MP), computadores, comunicação e sinais de comando via rádio, sistemas de vigilância e controle de trens autônomos.

Esses sistemas permitem um maior controle de todas as funções das locomotivas, principalmente em relação a sistemas de proteção mais precisos, o que confere aos componentes uma maior vida útil.

Dentro desse contexto, temos o sistema microprocessado realizando o controle dos motores elétricos, tanto na parte de torque quanto de proteção.

Atualmente as locomotivas presentes no mercado, são as chamadas diesel x elétrica, que utilizam a queima de combustível fóssil (diesel) através de um motor de combustão, para girar um “Gerador”, que por sua vez produz energia para alimentação dos motores de tração, esses transformam a energia elétrica em energia mecânica para movimentação da locomotiva. A Figura 1.1 apresenta um diagrama simplificado do funcionamento das locomotivas.

Figura 1.1 – Diagrama simplificado do funcionamento da locomotiva



Fonte: Gerência Mecânica (2009).

Considerando a locomotiva como um ativo, temos os componentes como itens do ativo. Quando temos a avaria da locomotiva temos impacto direto no transporte devido ao tempo que trem permanece parado aguardando atendimento, em alguns casos perde a condição de continuar circulando, sendo necessário ser rebocado.

As avarias de motor de tração e de motor diesel são historicamente as maiores responsáveis pelo alto impacto na circulação, justamente pelo fato de termos perda parcial ou total de funcionamento do ativo.

1.2 OBJETIVOS

Neste tópico será apresentado os objetivos do trabalho

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar análise e entendimento das causas raízes do alto índice de avarias das locomotivas Modelo BB36MP.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Analisar todos os dados de avaria dos ativos;
- b) Realizar análise de Pareto dos principais sistemas de falhas das locomotivas;
- c) Realizar análise da evolução dos modos de falha;
- d) Realizar estudo da árvore de falhas do principal modo de falha;
- e) Propor ações para minimizar quantidade de falhas relacionadas ao principal modo de falha.

1.3 JUSTIFICATIVA

O trabalho é necessário, devido ao alto índice de impactos relacionados a falha de locomotivas BB36, o que gera enorme impacto no trecho e grandes prejuízos, em função do tempo em que os trens permanecem parados, em função da avaria, em muitos casos impossibilita que a locomotiva permaneça em circulação, sendo necessário o direcionamento imediato para oficina.

Outro ponto relevante é ao alto custo de manutenção, bem como a quantidade de Homem/Hora (HH) utilizado na identificação e reparação do ativo. Vale ressaltar ainda o impacto na disponibilidade do ativo. Existem 26 locomotivas do modelo alocadas no corredor, sendo que o contrato de disponibilidade é de 23 locomotivas, ou seja, apenas 3 locomotivas podem ficar retidas, considerando o giro para manutenção preventiva ou corretiva, o que dá uma disponibilidade de quase 89%.

A avaria de uma locomotiva afeta diretamente a disponibilidade, devido ao tempo em que locomotiva permanece retida, desde o momento da falha, reboque do ativo até o posto de manutenção, pesquisa da falha, reparação e liberação para circulação, todo esse tempo retida em consequência afeta a preventiva de outros ativos, se tornando um ciclo vicioso.

Dependendo de o local onde ocorrer a avaria, pode levar até 2 dias para locomotiva chegar na oficina, o tempo de substituição do motor de tração leva em média 6 horas, sendo necessário 2 pessoas na atividade, ou seja, 12HH.

1.4 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A sequência do trabalho será composta pelos seguintes passos:

- a) Realizar levantamento dos dados de avaria da locomotiva BB36 no período de 2 anos, compreendidos entre os anos de 2014 e 2015;
- b) Analisar a base de dados, dos 2 anos, classificando por conjunto;
- c) Com base nos dados classificados, realizar uma análise de forma Pareto;
- d) Será realizado uma matriz de GUT, para priorização do conjunto a ser estudado;
- e) Criação de brainstorming para identificação de todas as possíveis causas para avaria;
- f) Criação de um diagrama de Ishikawa, para organização das causas mencionadas no brainstorming;
- g) Realização de benchmarking, para verificar oportunidades em outras unidades, ou mesmo outros ativos similares;
- h) Estudo minucioso das possíveis causas de avarias que permanecerem “ativas” no diagrama de Ishikawa, analisando tecnicamente, realizando medições, testes e validações das causas.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será desenvolvido em 5 capítulos, conforme abaixo:

- a) Capítulo 1: apresenta as informações básicas do trabalho, com uma breve explanação do assunto abordado, a justificativa do estudo, o objetivo geral e os específicos, bem como os procedimentos metodológicos;
- b) Capítulo 2: apresenta uma breve explicação das diferenças entre locomotivas, principais fornecedores. Será apresentado a análise dos dados das falhas, gráficos demonstrativos, ainda uma análise comparativa de confiabilidade entre 2 anos;
- c) Capítulo 3: será apresentado as ferramentas que serão utilizadas para análise do problema, ou seja, toda a parte teórica das metodologias de confiabilidade utilizadas no desenvolvimento do trabalho;
- d) Capítulo 4: será aplicado todas as ferramentas de confiabilidade para análise, demonstração e identificação das causas das falhas, utilizando-se da análise e informações abordadas nos capítulos anteriores;

- e) Capítulo 5: apresenta a conclusão do trabalho, explicitando todos os pontos observados durante a realização do trabalho, apresentação das causas das avarias, bem como as ações propostas para mitigar o número de avarias, as propostas para novos estudos.

2 LOCOMOTIVA BB36

Neste capítulo, será abordado os diferentes modelos de locomotivas existentes, como se diferenciam cada um dos componentes que a compõe, além da análise da base de dados e demonstração dos problemas, principais modos de falhas.

O entendimento desse capítulo é fundamental para a sequência do estudo, pois é através desses pontos que temos o desenvolvimento do modo de falha que terá o estudo aprofundado para determinação da causa raiz, bem como as ações para mitigar as falhas.

Existem vários modelos de locomotivas no mundo, sendo que cada modelo possui suas características, componentes dimensionados de acordo com seu projeto.

Atualmente no mundo temos 2 grandes concorrentes no fornecimento de locomotivas, a *Electromotive Diesel* (EMD) e a *General Electric* (GE). O ativo que será analisado é do fabricante GE.

O estudo será realizado em uma ferrovia, com locomotivas do modelo BB36MP, que é um uma locomotiva modificada, sendo modelo originário da C30. Sendo assim o estudo tem aplicação para todas as ferrovias que possuem o modelo de locomotiva C30 ou suas variações em função de alteração no projeto original.

Os componentes de cada locomotiva também possuem um *part-number*, que identificam o modelo do componente, sendo esses intercambiáveis ou não entre diferentes modelos de locomotivas. Os principais componentes do ativo a ser estudado são:

- a) Motor de tração – GE-761ANS
- b) Motor diesel – GE-7FDL16
- c) Alternador de tração – GE-GTA26
- d) Compressor – WBO
- e) Turbo alimentador – GE-7S1616

2.1 ANÁLISE DO PROBLEMA

A migração das locomotivas BB36-MP para o corredor Minas Rio teve início em janeiro de 2014 com as locomotivas 728 e 733 tendo recebido a 26ª locomotiva, 737 em agosto de 2015.

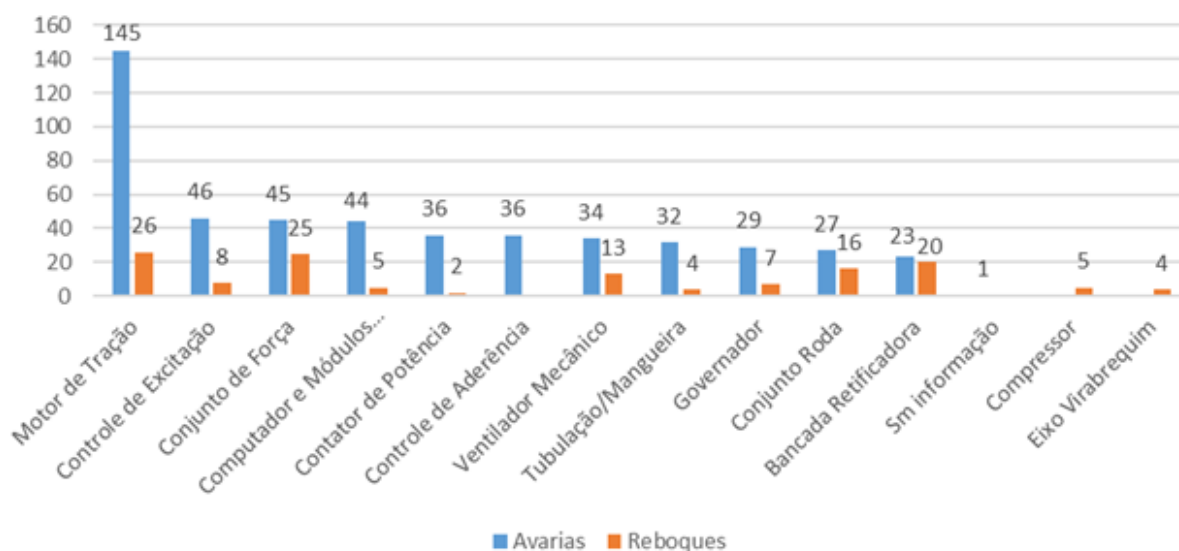
2.1.1 Análise da base de dados

Todo estudo de confiabilidade começa pela análise da base de dados, para evitar desperdícios de energia e de dinheiro, dessa forma temos uma dimensão do tamanho do problema e uma prospecção do resultado que pode ser obtido.

Foram analisados todos impactos de locomotivas no período de 2 anos, entre os dias 01 de janeiro de 2014 a 31 de dezembro de 2015.

Para entendimento, foi realizado a estratificação das falhas por conjunto, de forma de Pareto, conforme Gráfico 2.1. O banco de dados está disponível no Apêndice A.

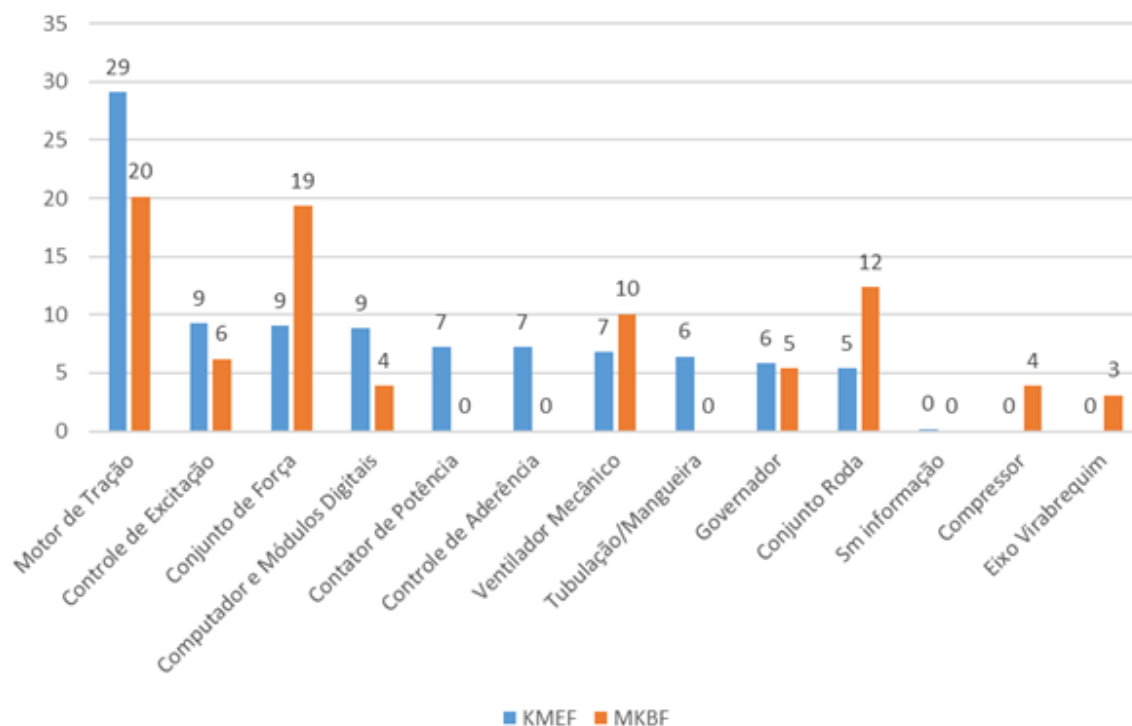
Gráfico 2.1 – Impactos KMEF e MKBF da locomotiva BB36 entre 2014 e 2015



Fonte: VLI (2015).

Como podemos notar, temos o conjunto “motor de tração”, sendo a maior barra do Pareto tanto em quilometragem média entre falhas (KMEF) quanto quilometragem média entre reboques (MKBF), mostrando a criticidade do problema, justificando dessa forma que as energias devem ser canalizadas para solução desse problema. Conforme o Gráfico 2.2, esse problema corresponde por 29% dos impactos no KMEF e 20% dos impactos no MKBF. O banco de dados está detalhado no Apêndice B.

Gráfico 2.2 – Taxa impacto KMEF e MKBF locomotiva BB36 por conjunto

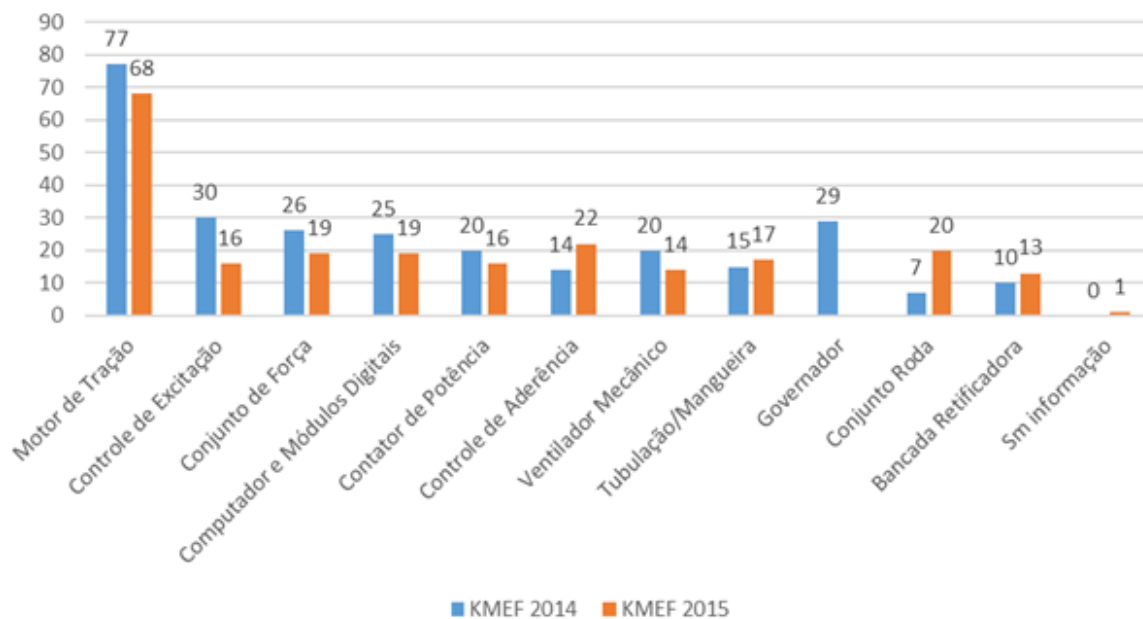


Fonte: VLI (2015).

2.1.1.1 Comparativo KMEF/MKBF 2014/2015

Para sequência da análise, para verificar a evolução das falhas foi realizado um comparativo do KMEF entre anos de 2014 e 2015, com objetivo de verificar o comportamento das falhas em relação aos Paretos, conforme Gráfico 2.3.

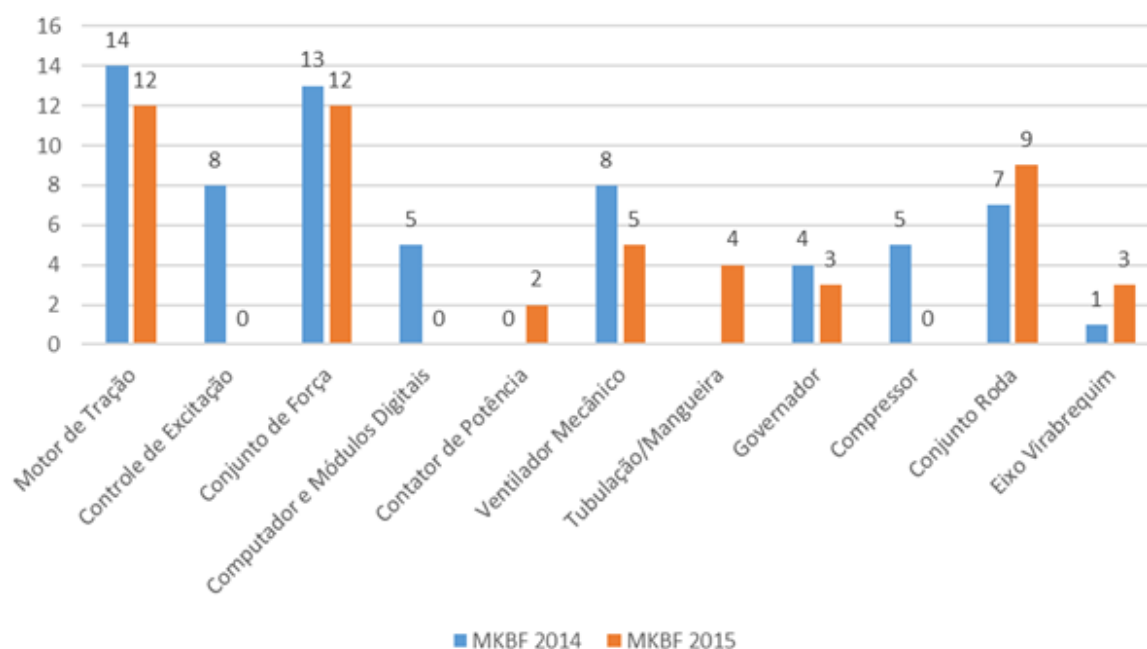
Gráfico 2.3 – Comparativo impactos KMEF por conjunto entre 2014 e 2015



Fonte: VLI (2015).

Foi realizado também uma análise comparativa do MKBF entre anos de 2014 e 2015, com objetivo de verificar o comportamento das falhas em relação aos Paretos, conforme o Gráfico 2.4. Os dados estão disponíveis no Apêndice D.

Gráfico 2.4 – Comparativo impactos MKBF por conjunto entre 2014 e 2015



Fonte: VLI (2015).

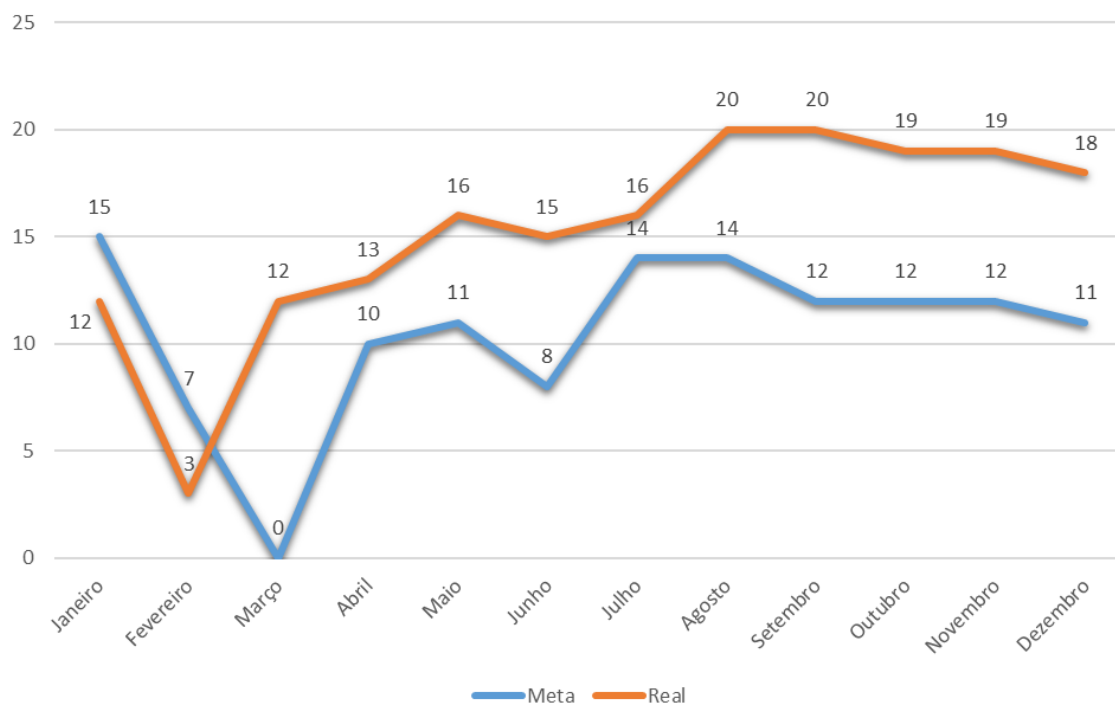
Conforme os Gráficos 2.3 e 2.4, podemos notar que não tivemos evolução em relação ao conjunto motor de tração, praticamente “andou” de lado, o que mostra que o problema persiste, apesar de não ter evoluído, o que já é um bom sinal, pois não demonstra sinais de deterioração (aumento no número de falhas em função do tempo).

2.1.1.1.1 Análise substituição de motores de tração

Para uma análise mais assertiva em relação a quantidade de motores de tração trocados, precisamos ir além da análise de impacto no trecho, pois existem motores de tração que são substituídos durante as manutenções preventiva e corretiva, que não geram impacto no trecho.

Sendo assim a melhor forma é verificar o consumo do componente, dessa forma foi verificado o consumo de motor de tração no ano de 2015, conforme o Gráfico 2.5. O banco de dados está disponível no Apêndice E.

Gráfico 2.5 – Análise de consumo do motor de tração no ano 2015



Fonte: VLI (2015).

Com base no Gráfico 2.5 acima, pode-se notar que a troca está muito acima da meta prevista para o componente, gerando déficit no orçamento da manutenção, em função do gasto não previsto para manutenção do ativo.

Um detalhe muito importante é que a meta de consumo foi baseada no histórico de consumo dos motores de tração da locomotiva BB36 nos demais corredores, antes de ser migrada para o corredor Minas Rio, ou seja, no corredor atual o consumo está muito acima, mesmo as locomotivas sendo as mesmas. Com base em todos os dados levantados comprova-se a necessidade urgente na tratativa do problema.

2.2 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Por meio da análise da base de dados, pode-se verificar que a falha de motor de tração é a principal barra do Pareto, correspondendo por 29% de todos impactos no KMEF e 20% dos impactos do MKBF. Analisando a evolução de falhas comparando 2014 e 2015 nota-se que o comportamento é exatamente o mesmo, ou seja, se nada for feito a quantidade de falhas será a mesma ou ainda irá aumentar em função da

deterioração. Ao verificar consumo de motor de tração nota-se um consumo extremamente alto, muito acima do programado, cerca de 45% acima.

A análise dos dados, a estratificação das falhas, bem como a análise da evolução das falhas e de consumo de motores de tração, evidencia com dados e fatos a criticidade do modo de falha, a importância em se investir tempo e dinheiro para estudo e entendimento do problema, somente dessa forma pode-se chegar as causas e propor soluções efetivas, que reduzam o número de falhas, a quantidade de consumo do componente.

Em consequência da redução de falhas e de consumo, tem-se o aumento considerável na disponibilidade dos ativos, bem como a redução de custos de manutenção tanto em componente, como em subitens e HH nas corretivas e preventivas, tudo isso resultará no aumento do transporte e conseqüentemente no lucro da empresa.

No próximo capítulo é será realizado uma explanação em relação aos métodos e ferramentas utilizadas na realização do estudo principalmente em relação a análise da base de dados que foi mostrada nesse capítulo, explicando e exemplificando cada uma das ferramentas utilizadas, os conceitos e a aplicabilidade de cada um deles. É de suma importância que a sequência dos métodos seja cumprida, para que os resultados obtidos sejam sustentáveis e realmente tragam o retorno esperado.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Todo o estudo é pautado em métodos e ferramentas da engenharia de confiabilidade, para analisar, identificar problemas e principalmente, propor soluções com menor custo, menor gasto de energia e que trarão maior retorno. Dentre as inúmeras ferramentas existentes, será abordado aqui apenas as ferramentas aplicadas nesse estudo.

3.1 INDICADORES DE CONFIABILIDADE

Para o entendimento do trabalho, primeiramente se faz necessário o entendimento de quais métodos utilizados para mensurar a confiabilidade.

Atualmente nas ferrovias do Brasil são 3 os principais indicadores utilizados para “medir” a confiabilidade das locomotivas:

- a) KMEF – Quilometragem média entre falhas: Para todo trem parado por 20 minutos ou mais cuja a causa seja problema de locomotiva, contabiliza-se uma avaria, paradas inferiores não são contabilizadas. (O autor, 2019)

Quilometragem Rodada

Número de avarias

- b) MKBF – Quilometragem média entre reboques: Para toda locomotiva que perder sua condição de circulação, será contabilizado um reboque, devendo seguir rebocada para o posto de manutenção. (O autor, 2019)

Quilometragem Rodada

Número de Reboques

- c) THP – Trem Hora parado causa falha de locomotivas: Todo o tempo que o trem permanecer parado cuja causa seja avaria de locomotivas, o tempo será somado e contabilizado para Locomotivas. (O autor, 2019)

Tempo de Trem Parado (minutos)

Número de trens que circularam

Nesse trabalho será analisado o impacto em 2 indicadores, KMEF e MKBF.

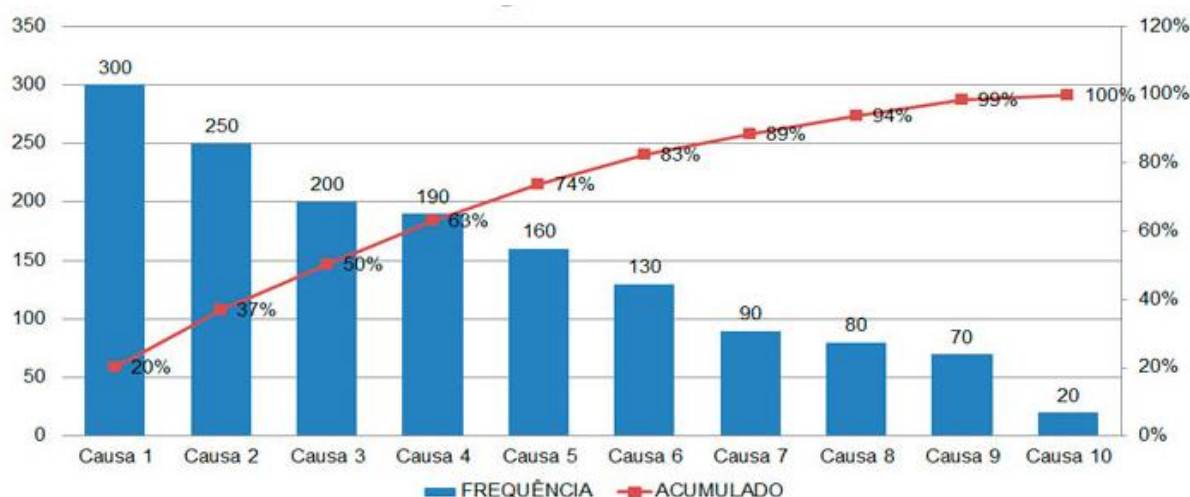
Vale ressaltar que existem impactos de MKBF que não impactam no KMEF, devido locomotiva ter sido rebocada sem estar anexada em trem, dessa forma como não impactou em trem, entra apenas no indicador de reboque (MKBF).

3.2 DIAGRAMA DE PARETO

Essa ferramenta, consiste em analisar os dados, organizar de forma decrescente os modos de falhas do ativo de acordo com a frequência em que ocorrem através de um gráfico de barra. (RIGONI, 2019).

Geralmente 80% dos problemas estão concentrados em 20% das causas. Através desse método podemos identificar facilmente onde estão concentrados os maiores problemas, dessa forma canalizar as energias e recursos naquilo que trará maior resultado (RIGONI, 2019). Segue no Gráfico 3.1 um exemplo

Gráfico 3.1 – Exemplo de diagrama de Pareto



Fonte: Marcondes (2019).

Como podemos observar pela Gráfico 3.1, as causas são organizadas de ordem decrescente, dessa forma fica fácil identificar qual a principal modo de falha que causam parada do equipamento.

3.3 MATRIZ DE GUT

Esse método é utilizado com objetivo de definir prioridades, um método simples e eficaz para auxiliar nas tomadas de decisão. Basicamente é colocar os problemas em uma planilha, dar notas de 1 a 5 para cada uma das condições, ao final multiplica-se os números, organiza-se em ordem decrescente, o que tiver maior valor deve ser priorizado e tratado imediatamente (CAMARGO, 2018; RIGONI, 2019).

G – Gravidade

U – Urgência

T – Tendência

Para essa análise precisamos lembrar de um outro conceito, que é a diferença entre “ativo” e “sistema”. Sendo, segundo Rigoni (2019):

- a) Ativo – Máquina ou componente, que pode ser composto ou não por vários sistemas;
- b) Sistema – Conjunto de subsistemas que compõe o sistema (componentes, peças), o conjunto de sistemas compõe um ativo.

Segue na Tabela 3.1 um exemplo da matriz GUT.

Tabela 3.1 – Exemplo matriz de GUT

Problema	G	U	T	G x U x T
Orçamento anual não aprovado	1	3	5	15
Planilha orçamentária ineficiente	5	5	4	100
Falta de controle de fluxo de caixa	4	4	4	64

Fonte: Camargo (2018).

Observe na Tabela 3.1 após multiplicação temos como causa a ser priorizada “Planilha orçamentária ineficiente”, pois é o maior número.

3.3.1 Gravidade

Qual a gravidade do problema, o que acontece quando ele ocorre, temos que levar em consideração o impacto tanto para o ativo, quanto para o sistema, o que ocorre se o aquele problema não for solucionado (CAMARGO, 2018; RIGONI, 2019). As notas a serem atribuídas levam em consideração o que está exposto no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Atribuição das notas em relação à gravidade

Nota	Gravidade	Descrição
5	Extremamente grave	Deve ser priorizado imediatamente, caso contrário os danos podem ser irreversíveis.

4	Muito grave	Deve ser corrigido, pode causar danos graves para o sistema, para o ativo ou para o negócio da empresa.
3	Grave	Impactos regulares, tanto para o sistema, para o ativo ou para o negócio da empresa.
2	Pouco grave	Danos mínimos para o sistema, para o ativo ou para o negócio da empresa.
1	Sem gravidade	Danos leves para o sistema, para o ativo ou para o negócio da empresa.

Fonte: Adaptado de Camargo (2018).

3.3.2 Urgência

É o próprio significado da palavra, a urgência em se resolver o problema para se evitar maiores prejuízo, está relacionada ao tempo (CAMARGO, 2018; RIGONI, 2019). Quanto tempo podemos esperar para que o problema seja solucionado? As notas a serem atribuídas levam em consideração o Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Atribuição de notas em relação à urgência

Nota	Urgência	Descrição
5	Imediatamente	Deve ser corrigido imediatamente, caso contrário os danos podem ser irreversíveis.
4	Muito urgente	Deve ser corrigido, pode causar danos graves para o sistema, para o ativo ou para o negócio da empresa.
3	Urgente	Priorizar a solução quando possível
2	Pouco urgente	Pode esperar a solução
1	Sem nenhuma urgência	Sem nenhuma pressa para que problema seja resolvido

Fonte: Adaptado de Camargo (2018).

3.3.3 Tendência

O que acontecerá em relação ao problema se nada for feito, permanecerá o mesmo, aumentará, qual a probabilidade de que ele ocorra (CAMARGO, 2018; RIGONI, 2019). As notas a serem atribuídas levam em consideração o que está exposto no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Atribuição de notas em relação à tendência

Nota	Tendência	Descrição
------	-----------	-----------

5	Ir� piorar rapidamente	Deve ser corrigido imediatamente, caso contrário teremos números de problemas fora de controle.
4	Ir� piorar	Deve ser corrigido, pode causar danos graves para o sistema, para o ativo ou para o negócio da empresa.
3	Ir� piorar a médio prazo	Priorizar a soluço quando possível
2	Ir� piorar a longo prazo	Pode esperar a soluço
1	Sem nenhuma altera�o	Problema poderá até desaparecer com tempo

Fonte: Adaptado de Camargo (2018).

Após a classifica o, devemos multiplicar os números referentes ao mesmo modo de falha, a prioriza o deve ser feita em ordem decrescente, ou seja, quanto maior o resultado maior a prioridade na soluço daquele problema. (CAMARGO, 2018; RIGONI, 2019).

3.4 BRAINSTORMING

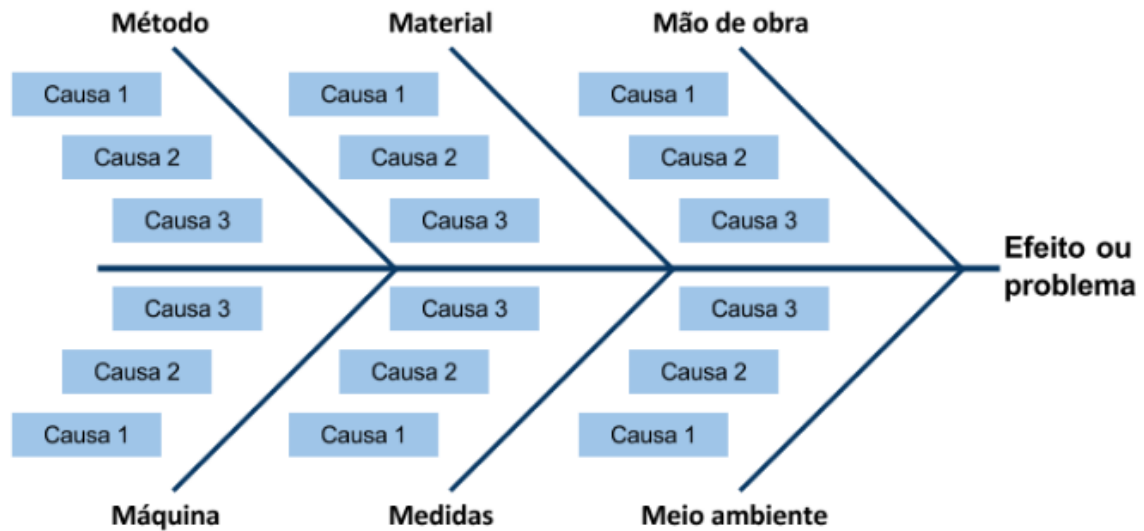
Do inglês “tempestade de ideias”, consiste em reunir uma equipe multidisciplinar, pessoas com conhecimento técnico do equipamento, do processo para que possam contribuir com sua experiência, informando quais as possíveis causas para o modo de falha do ativo. (OSBORN, 2009)

Dessa forma consegue-se garantir que todas ou quase todas as causas do modo de falha estejam explicitados, além de ser uma ferramenta de engajamento, pois mobiliza toda a equipe envolvida e faz com que todos se sintam importantes, tornando todo o processo mais fácil, uma vez que toda equipe irá “comprar a ideia”, pois participaram do projeto (OSBORN, 2009; RIGONI, 2019)

3.5 DIAGRAMA DE ISHIKAWA

Conhecido como diagrama “espinha de peixe”, ou mesmo de causa e efeito, tem o objetivo de organizar as ideias, separando as causas em processos, por isso é importante que essa etapa aconteça apenas após o brainstorming, pois já terá todas as causas mapeadas, sendo necessário apenas organizar em processos. Também conhecido como 6M (RIGONI, 2019). A Figura 3.1 é um exemplo de diagrama de Ishikawa

Figura 3.1 – Exemplo de diagrama de Ishikawa



Fonte: Roveda (2017).

A partir do diagrama, tem-se as ideias organizadas de forma consistente, facilitando a análise e até mesmo o direcionamento na solução do problema (ROVEDA, 2017):

- a) **Método:** Toda causa que esteja relacionada a metodologia de trabalho, como procedimento, experiência, expertise do operador;
- b) **Material:** A causa está relacionada a falha de material, um item utilizado está não conforme, ou mesmo mal dimensionado, mau projetado;
- c) **Mão de obra:** Basicamente é uma falha humana na execução de alguma atividade, ou em algum passo de um procedimento;
- d) **Máquina:** Algum desvio na máquina, ou mesmo problema em uma das máquinas utilizadas em algum dos processos;
- e) **Medidas:** O problema pode ser em alguma medida, ou mesmo falta de alguma ferramenta específica, ou com parâmetros fora do especificado;
- f) **Meio ambiente:** Está relacionado ao ambiente interno ou externo, pode ser algo inerente ou não ao processo, espaço físico entre outros.

3.6 TÉCNICA DOS 5 PORQUÊS

Ferramenta que vem do inglês 5 Why (5PQ) (Gráfico 3.4), foi criada com objetivo de auxiliar nos problemas internos, como uma ferramenta de qualidade,

consiste basicamente em questionar o motivo do problema, ao perguntar se questionar “Por Que” consegue-se definir de forma clara e objetiva a causa raiz do problema, evitando que seja tratado o problema e não a causa. (OS 5 PORQUÊS..., 2014; SERRAT, 2017).

Quadro 3.4 – Exemplo de aplicação da técnica dos 5PQ

Problema	Monumento da praça deteriorado
Por que?	Porque é limpo com mais frequência que os outros monumentos
Por que?	Porque tem mais dejetos de pássaros que os outros monumentos
Por que?	Porque tem mais pássaros que demais monumentos
Por que?	Porque tem mais insetos que demais monumentos
Por que?	Porque a lâmpada que ilumina esse monumento é diferente e atrai mais insetos

Fonte: RIGONI (2019).

Conforme o Quadro 3.4, pode-se observar qual é a causa raiz do problema, dessa forma resolvendo esse desvio o problema será solucionado.

3.7 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi demonstrado como é realizado o cálculo dos indicadores de confiabilidade (KMEF e MKBF), que são os direcionadores para medir a eficiência dos processos, bem como a definição e explicação dos conceitos que serão utilizados nesse estudo, tornando fácil o entendimento do leitor, dentre elas o gráfico de Pareto, matriz GUT, Brainstorming, Diagrama de Ishikawa, técnica dos 5 Porquês.

O conhecimento de cada uma das ferramentas se faz necessário para entendimento da sequência no estudo realizado, bem como o entendimento das análises, das causas e dos planos de ação que serão propostos para minimizar as falhas. As ferramentas de confiabilidade aqui utilizadas são simples, objetivas e de eficácia comprovada. No próximo capítulo será demonstrado a utilização de cada uma das ferramentas no estudo e nas análises realizadas. (O autor, 2019)

4 DESENVOLVIMENTO

Conforme demonstrado na análise do problema item no 2.1 desse trabalho, consta o gráfico de Pareto das principais causas de avaria da locomotiva. Esse tópico inicia-se com o desenvolvimento da Matriz de GUT, para auxiliar na tomada de decisão de qual conjunto será realizado o estudo. Segue na Tabela 4.1 a Matriz GUT.

Tabela 4.1 – Matriz de GUT das falhas da locomotiva BB36 no ano 2015

CONJUNTO	GRAVIDADE	URGÊNCIA	TENDÊNCIA	TOTAL
Motor de Tração	4	5	5	100
Controle de Excitação	2	3	2	12
Conjunto de Força	4	4	4	64
Computador e Módulos digitais	2	2	2	8
Contator de Potência	1	2	2	4
Controle de Aderência	2	1	1	2
Ventilador Mecânico	4	4	3	48
Tubulação/Mangueira	3	3	3	27
Governador	2	2	1	4
Conjunto Roda	5	4	3	60
Compressor	4	3	3	36
Eixo Virabrequim	5	2	2	20

Fonte: O autor (2019).

Conforme a Tabela 4.1 e diagrama de Pareto, o foco desse estudo será no conjunto “Motor de Tração”.

A Fotografia 4.1 apresenta apenas o motor de tração.

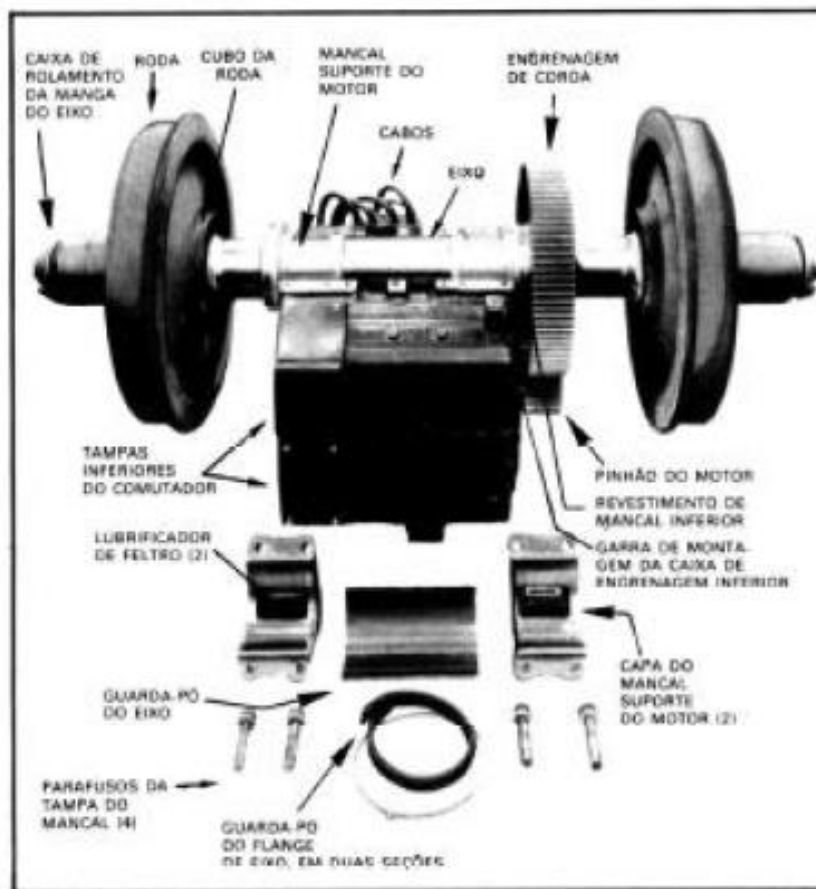
Fotografia 4.1 – Motor de tração



Fonte: O autor (2019).

A Figura 4.1 ilustra o conjunto motor de tração completo em partes para melhor entendimento.

Figura 4.1 – Conjunto motor de tração completo



Fonte: General Electric Brasil (1982).

Através da Figura 4.1 nota-se, que são inúmeros os itens que compõe a montagem do conjunto motor de tração, sendo que a inspeção e manutenção do componente é feita por colaboradores de diferentes especialidades, truque e elétrica.

- Truque – responsável pela inspeção da parte mecânica do motor, como mancal, nível de graxa da caixa de engrenagem, nível de óleo do mancal, além de ser responsável pela montagem e desmontagem do conjunto;
- Elétrica – responsável pela inspeção da parte elétrica (interna), como coletor, escovas, isoladores, limpeza.

4.1 REALIZAÇÃO BRAINSTORMING

De posse de todas as informações e análises, foram realizadas duas reuniões, uma com colaboradores da elétrica e outra com colaboradores da área de truque, para

evitar conflitos de ideias e também para que se sentissem à vontade para opinar. Esse processo é conhecido como Brainstorming, conforme explanado no capítulo 3.4 desse trabalho. Foi anotado todos os pontos citados na reunião, para posterior análise, segue Quadro 4.1 com resultado.

Quadro 4.1 – Resultado do Brainstorming

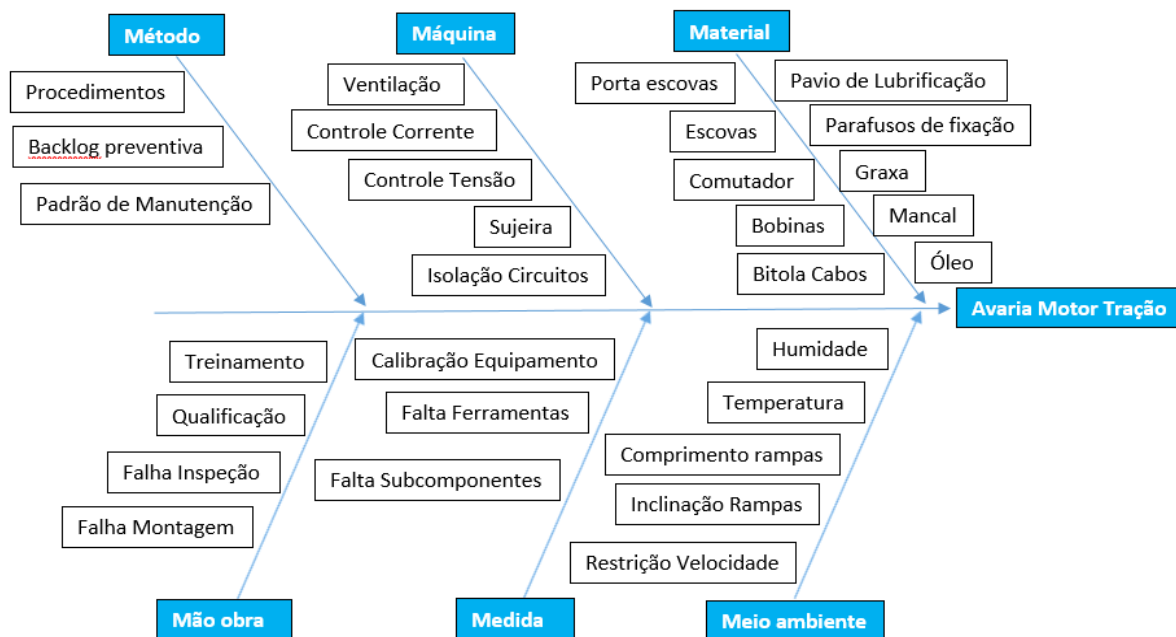
Elétrica	Truque
Escova	Mancal
Porta escova	Óleo
Comutador	Graxa
Bobina interpolo	Feltro Vedação
Sujeira	Parafusos Fixação
Backlog Manutenção	Backlog Manutenção
Padrão de manutenção	Padrão de manutenção
Procedimento	Procedimento
Bitola Cabos	Mecha Lubrificação
Treinamento	Treinamento
Falha na inspeção	Falha na inspeção
Sistema de proteção corrente	Falha na montagem
Sistema de proteção tensão	Calibração Ferramentas
Ventilação	Falta Material
Falta Ferramentas	Falta Ferramentas
Restrição velocidade via	
Temperatura	
Regime corrente dos motores	

Fonte: O autor (2019).

4.2 REALIZAÇÃO DIAGRAMA ISHIKAWA

Diante das informações obtidas, foi realizado a organização das ideias através do Diagrama de Ishikawa. Segue na Figura 4.2 o diagrama realizado.

Figura 4.2 – Diagrama de Ishikawa



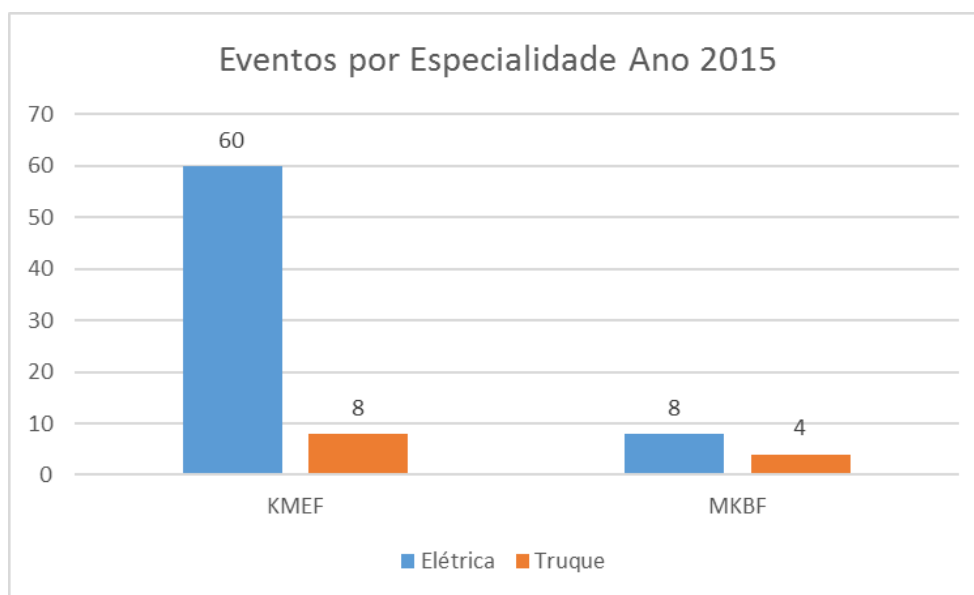
Fonte: O autor (2019).

A partir da Figura 4.2 pode-se observar que existem inúmeras possibilidades, principalmente na parte de materiais.

Para evitar desperdícios de tempo e energia, foi novamente analisado a base de dados de 2015 e realizado um Pareto em relação a qual especialidade de falha do conjunto motor de tração é mais recorrente, se é falha na parte elétrica ou truque (mancal, mecha, roda, cora, pinhão).

O Gráfico 4.1 apresenta o Gráfico de Pareto em relação a especialidade de falhas. O banco de dados está disponível no Apêndice F.

Gráfico 4.1 – Pareto de falhas de motor de tração em 2015 por especialidade

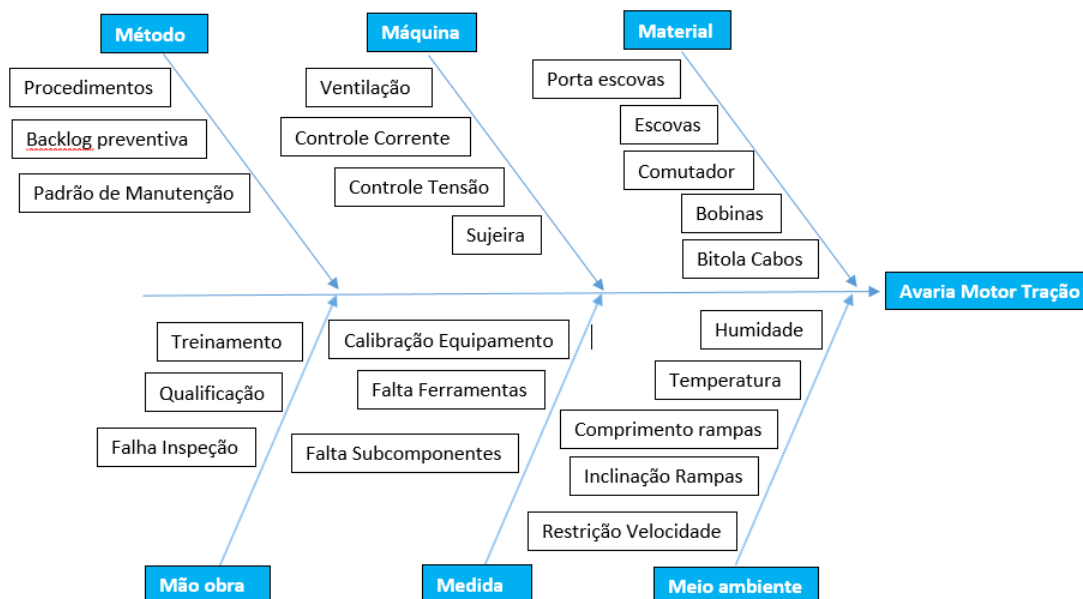


Fonte: VLI (2015).

Conforme o Gráfico 4.1, pode-se notar que maior índice de falhas tanto em KMEF quanto MKBF estão concentrados em falhas elétricas, que representam 88% impactos no KMEF e 67% do MKBF.

Com base nos dados, foi novamente refeito o diagrama de Ishikawa, com foco em relação a falhas elétricas. A Figura 4.3 mostra o novo diagrama de Ishikawa com foco na especialidade elétrica.

Figura 4.3 – Diagrama Ishikawa da especialidade elétrica



Fonte: O autor (2019).

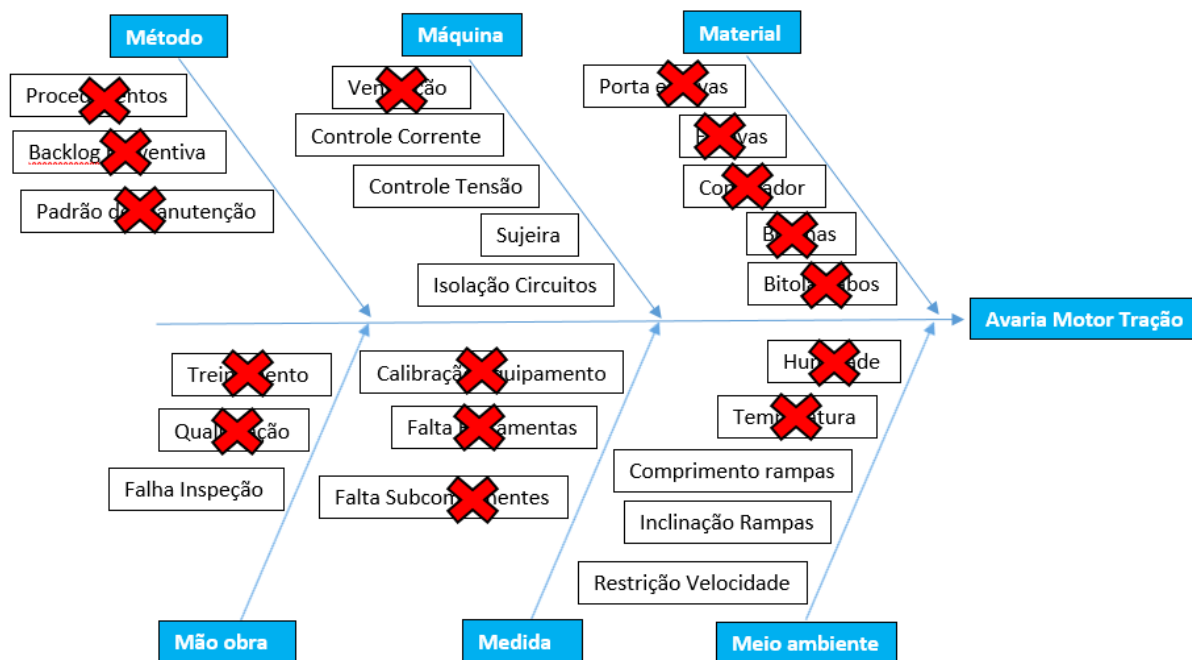
O diagrama que será estudo a fundo será o demonstrado na Figura 4.3.

4.2.1 Estudo Comparativo das Causas

Por meio dos dados analisados, a fim de priorização e direcionamento assertivo das causas do problema, foi realizada uma análise do diagrama de Ishikawa, com foco na comparação com anos anteriores, isso devido a locomotiva BB36 terem sido migradas de outros corredores para o atual corredor (Minas/Rio) e conforme informado no item 2.1.1.1.1 deste trabalho, devido ao consumo de motores de tração no atual corredor estar muito acima dos demais corredores.

Esse estudo comparativo basicamente consiste em analisar as diferenças entre demais corredores e o corredor atual, bem como as similaridades, isso para cada um dos problemas listados no diagrama de Ishikawa, através dessa análise pode-se notar que foram eliminadas praticamente todas as possíveis causas, conforme Figura 4.4.

Figura 4.4 – Diagrama de Ishikawa com análise comparativa



Fonte: O autor (2019).

A seguir a explicação do porque cada item foi eliminado.

a) Método:

- Procedimentos: Os procedimentos utilizados são os mesmos dos demais corredores de onde as locomotivas foram “migrada”;
- Padrão de manutenção: Analisado e verificado que o escopo de manutenção, o checklist é exatamente o mesmo utilizado nos demais corredores, inclusive as locomotivas entram com maior periodicidade para preventiva que nos demais corredores, ou seja, a possibilidade de identificar a falha é maior do que nos demais corredores, sendo descartado portando essa variável. A manutenção do componente em si também não teve alteração de escopo ou mesmo da empresa que realiza o reparo, sendo descartado essa possibilidade;
- Backlog de preventiva: Analisando os dados, foi identificado que o backlog de manutenção do ativo é menor que nos demais corredores, ou seja, a locomotiva entra mais vezes para preventiva, dessa forma têm-se uma maior visibilidade e tratativa dos problemas, sendo descartado como uma possível causa.

- b) Máquina – Por meio da comparação foram eliminadas as causas a seguir:
- Ventilação: Não houve alteração no projeto em relação a ventilação, as locomotivas permanecem idênticas a quando foram migradas para corredor, descartado portando essa possibilidade.
- c) Material – Com a comparação foram eliminadas todas as causas, pois não houve alteração em relação ao projeto do motor de tração, os componentes fornecidos são dos mesmos fabricantes e dentro das mesmas especificações técnicas, portando todos os itens foram descartados como possível causa:
- Porta escovas;
 - Escovas;
 - Comutador;
 - Bobinas;
 - Bitola dos cabos;
- d) Mão de Obra:
- Treinamento: Todos os colaboradores receberam o treinamento específico da locomotiva, com carga horária total de 40 horas, pela equipe da Engenharia de Locomotivas da empresa VLI, sendo divididos em 2 módulos, realização de check list de preventiva e realização de inspeção de diagnóstico em componentes;
 - Qualificação: Pessoas que realizam a manutenção estão devidamente qualificadas, foi realizado um acompanhamento “on the job”, somente os colaboradores certificados realizam a inspeção e intervenção no componente.
- e) Medida:
- Calibração equipamentos: Todos os equipamentos utilização na inspeção e intervenção dos componentes que necessitam de calibração estão devidamente calibrados.
 - Falta de ferramentas: Todas as ferramentas necessárias as manutenções estão disponíveis, assim como nos demais corredores de onde as locomotivas foram migradas.

- Falta de subcomponentes: Não existe falta de material, todos itens necessários a manutenção do componente está disponível.
- f) Meio ambiente:
- Humidade: Por meio da pesquisa via portais informativos na internet, não foi identificado diferença entre os corredores anteriores onde as locomotivas circulavam e o atual corredor.
 - Temperatura: Também por meio da pesquisa via portais informativos na internet, nota-se que nos demais corredores a temperatura é muito maior que no local onde as locomotivas circulam atualmente, tanto temperatura média quanto temperatura pontual, ou seja, anteriormente a condição era muito pior para o componente do que no corredor atual.

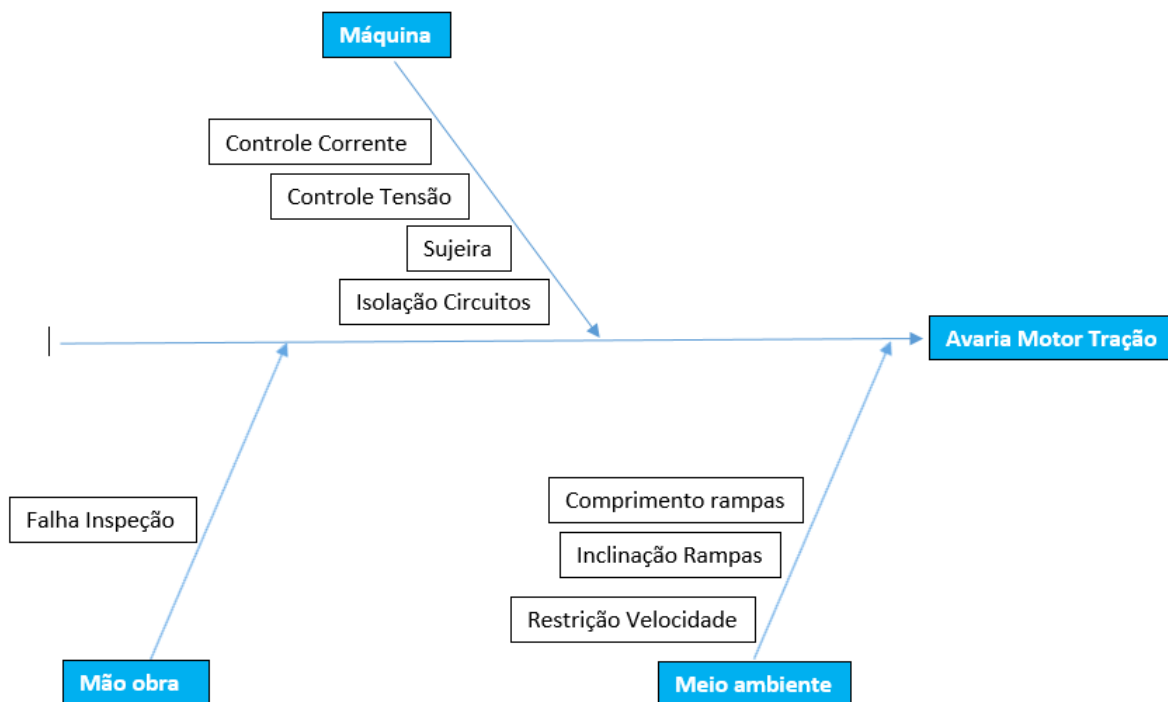
Mediante ao benchmarking, sobraram apenas as opções que serão trabalhadas no tópico abaixo.

4.2.2 Análise Causas Pendentes do Diagrama de Ishikawa

Como mencionado no item 4.2.1, muitas causas foram eliminadas apenas realizando o comparativo entre anos anteriores, ou seja, apenas analisando o que mudou ou não que pudesse influenciar na avaria do motor de tração.

Conforme a Figura 4.5 apresenta, permaneceram apenas algumas causas, que serão estudadas individualmente.

Figura 4.5 – Diagrama de Ishikawa após análise comparativa



Fonte: O autor (2019).

4.2.2.1 Controle de Corrente

A locomotiva BB36 que circula no corredor é “Microprocessada”, ou seja, possui um Controlador Lógico Programável (CLP) que faz todo o controle da locomotiva, controle de excitação, de propulsão, de proteção dos motores e também do motor diesel.

O sistema de controle de Corrente tanto dos motores de tração, quanto de saída do Gerador P é feito por transdutores de corrente, que fazem a leitura do campo magnético que circula nos cabos e envia o sinal para o Sistema.

O sistema através desse sinal identifica qual a corrente que está circulando e reduz a excitação para proteção dos componentes e se persistir faz o corte total da excitação, com isso tem-se a proteção dos componentes contra excesso de corrente, além disso gera um “Log” de alarme “Sobrecarga de corrente nos motores de tração”.

Segue na Fotografia 4.2 o transdutor de corrente, responsável por realizar a leitura de corrente dos motores de tração.

Fotografia 4.2 – Transdutor de corrente dos motores de tração



Fonte: O autor (2019).

A proteção é feita em função da corrente que passa pelos motores de tração, sendo que existe um parâmetro por tempo para cada faixa de trabalho, segue na Tabela 4.2 o regime de corrente para proteção dos motores conforme tempo.

Tabela 4.2 – Limite corrente para proteção dos motores de tração

Tempo Máximo [min]	Faixa de Corrente [A]
60	700 ~ 730
30	731 ~ 740
15	741 ~ 750
5	Acima de 750 A

Fonte: Dionata (2013).

Para o teste em relação a eficiência no controle e corrente, foi realizado os seguintes testes.

- a) Conferir a corrente indicada pelo Microprocessamento e comparar com o físico, através de um alicate amperímetro;
- b) Realizado alteração na configuração do transdutor de corrente, para que o mesmo enviasse um sinal conforme tempos acima.

Exemplo: Enviando sinal de 720 amperes para o sistema durante 60 minutos, após esse tempo verificar se sistema cortou excitação e gerou o “Log” de “Sobrecarga

nos motores de tração”. O teste foi feito para todos os 4 regimes mostrados Tabela 4.2.

Esses testes foram realizados em 5 locomotivas diferentes para validação, sendo que em todos os testes obteve-se a atuação conforme esperado, descartando, portanto, falha no controle de corrente.

4.2.2.2 Controle de Tensão

A locomotiva BB36 que circula no corredor é “Microprocessada”, ou seja, possui um CLP que faz todo o controle da locomotiva, controle de excitação, de propulsão, de proteção dos motores e também do motor diesel.

O sistema de controle de Tensão tanto dos motores de tração, quanto de saída do GP é feito por um transdutor de tensão, que faz a leitura direta da tensão de saída do Gerador Principal e envia para o sistema. Através desse sinal identifica qual a tensão que está circulando e reduz a excitação para proteção dos componentes e se persistir faz o corte total da excitação, com isso temos a proteção dos componentes contra excesso de tensão, além disso gera um “Log” de alarme “Sobrecarga de tensão nos motores de tração”.

A Fotografia 4.3 apresenta o transdutor de tensão, responsável por realizar a leitura de tensão dos motores de tração.

Fotografia 4.3 – Transdutor de tensão



Fonte: O autor (2019).

A proteção é feita em função da tensão de saída do gerador principal, sendo que o valor máximo é de 1290 volts DC, acima desse valor o sistema corta a excitação e gera o “Log” de alarme.

Para o teste em relação a eficiência no controle de tensão, foi realizado o seguinte teste:

- a) Conferir a tensão indicada pelo Microprocessamento e comparar com o físico, através de um multímetro instalado na saída do gerador principal;
- b) Realizado a alteração na configuração do transdutor de tensão, para que o mesmo enviasse um sinal de 1295 volts DC para o sistema.

Esses testes foram realizados em 5 locomotivas diferentes para validação, sendo que em todos os testes tivemos a atuação conforme esperado, descartando, portanto, falha no controle de corrente.

4.2.2.3 Sujeira

Foram analisados todos os motores de tração de 4 locomotivas que realizaram preventiva, totalizando 32 motores de tração, além de 4 motores de tração avariados, em todos os casos não foi identificado uma quantidade sujeira que justificasse ou mesmo contribuísse para avaria do motor de tração.

4.2.2.4 Isolação Circuitos

Foi verificado o histórico de preventivas realizados no período de 1 ano, e nenhuma locomotiva foi liberada com isolação do circuito abaixo de 1M Ω , que é o parâmetro definido como isolação mínima do circuito para circulação do ativo. A medição da isolação do circuito é um item do checklist preventivo de todas as manutenções.

4.2.2.5 Falha na Inspeção

Apesar de todos os colaboradores que realizam a atividade serem treinados e certificados, não se pode garantir que em 100% das inspeções não exista falha do colaborador, sendo essa uma variável que não se pode eliminar. Para minimizar esse impacto, a alternativa é as auditorias dos técnicos especializados e especialistas durante e após manutenções, bem como o acompanhamento “*on the job*” constante na oficina.

4.2.2.6 Comprimento e inclinação das rampas, Restrição de velocidade

Essas causas foram analisadas em conjunto, em função de todas serem causas externas, ou seja, sem atuação direta da equipe de manutenção de locomotivas. Para a determinação da quantidade de vagões cada composição formada por uma quantidade de locomotivas definidas irá transportar, essas 3 causas juntamente com a potência da locomotiva são os fatores determinantes, esse processo é conhecido como “quadro de tração”. O quadro de tração é calculado como mencionado justamente em função da potência da locomotiva, as restrições vigentes do trecho, a inclinação e tamanho das rampas.

Comparando essas 3 causas, existe como consequência um fator em comum para todas elas, aumento da corrente dos motores de tração das locomotivas, isso porque quanto menor a velocidade do trem maior será a corrente dos motores de tração. Ou seja, todas essas causas culminam em uma consequência em comum, aumento da corrente dos motores de tração, que é um fator determinante para redução da sua vida útil do componente. Para validação da possível causa ser a alta corrente nos motores de tração, foram realizados alguns outros testes e análises.

4.3 ANÁLISE DOS MOTORES DE TRAÇÃO

Para sequência do estudo, foi realizado o acompanhamento *full time*, de todos os motores de tração substituídos no período de 15 dias (6 motores), além disso foi acompanhado a inspeção durante as revisões de 4 locomotivas.

Com a análise dos motores de tração danificados e das escovas tanto dos motores avariados quanto dos motores de tração das locomotivas durante as revisões, pode-se notar algumas semelhanças.

4.3.1 Escovas Sinal de Aquecimento

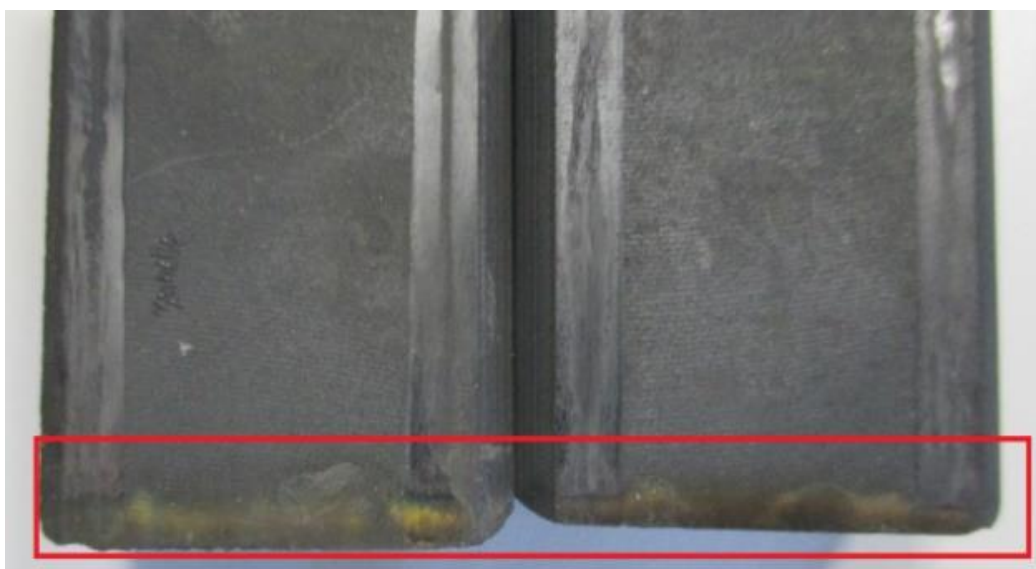
Observou-se que as escovas estavam com sinais de aquecimento, marca amarelada nas bordas, conforme as Fotografias 4.4 e 4.5.

Fotografia 4.4 – Escovas com sinais de aquecimento I



Fonte: O autor (2019).

Fotografia 4.5 – Escovas com sinais de aquecimento II



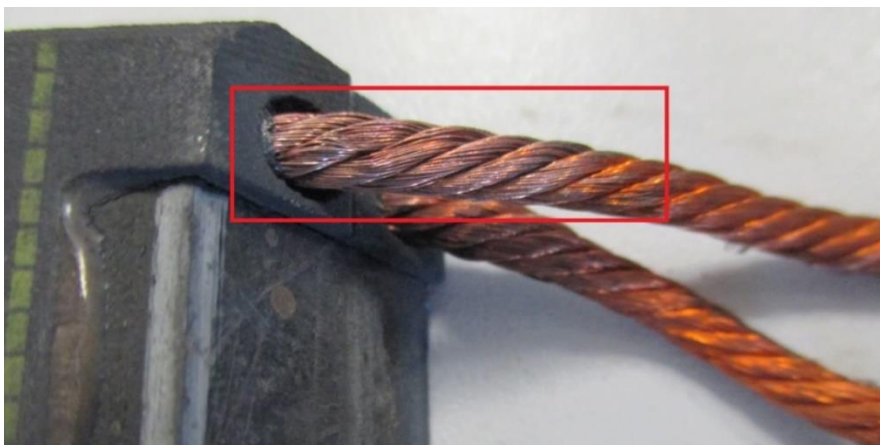
Fonte: O autor (2019).

Uma das causas desse aquecimento é o excesso de corrente.

4.3.2 Rabichos das escovas com aquecimento

Observou-se que os “rabichos” das escovas estavam com sinais de aquecimento, coloração “azuladas”, conforme a Fotografia 4.6.

Fotografia 4.6 – Rabicho com sinais de aquecimento



Fonte: O autor (2019).

Essa descoloração do cobre é ocasionada principalmente pelo excesso de temperatura, que é causada em muitos casos ou por falha da escova ou mesmo excesso de corrente.

4.3.3 Anéis de fascamento com excesso de flash over

Observou-se que os anéis de flash over estavam com sinais excessivos de desgaste e flash over, acima do normal, conforme a Fotografia 4.7.

Fotografia 4.7 – Anel de faiscamento com excesso de Flash Over



Fonte: O autor (2019).

Esse anel tem a função de absorver o *flash over*, evitando que danifique os demais subcomponentes do motor de tração, porém conforme fotos o desgaste está excessivo, sendo que as causas para esse desvio são excesso de tensão ou de corrente.

4.3.4 Comutador danificado e escovas curtas

Observou-se que o comutador estava com sinais claros de desgaste, sinais de arraste de material, escovas curtas conforme Fotografia 4.8.

Fotografia 4.8 – Anel com arraste de material



Fonte: O autor (2019).

Esse arraste de material é ocasionado pelo desgaste excessivo da escova, porém esse desgaste de escovas pode ser tanto causa quanto consequência, pois o excesso de corrente causa o desgaste acelerado das escovas.

4.4 ESTUDO COMPARATIVO DE CORRENTE DOS MOTORES DE TRAÇÃO

Em função dos dados demonstrados e a suspeita em relação a alta corrente ser a principal causa de avaria dos motores de tração, foi realizado uma análise comparativa de corrente dos motores de tração.

Esse estudo foi realizado comparando-se a corrente dos motores de tração no corredor Minas/Rio e demais corredores de onde as locomotivas BB36 foram migradas.

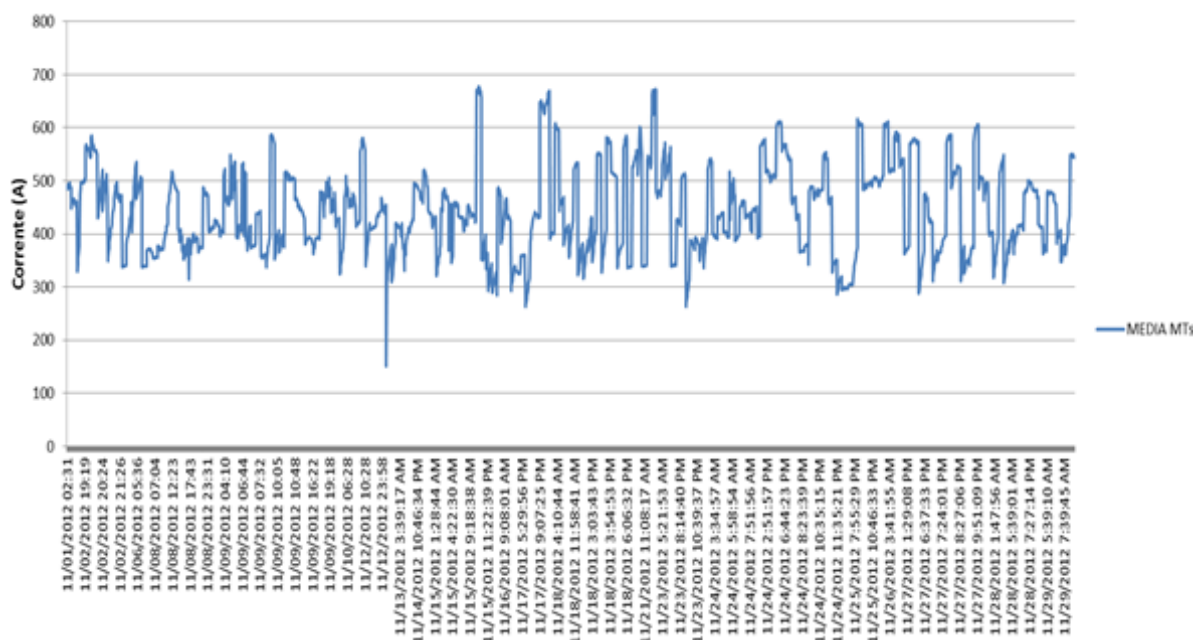
O levantamento foi realizado levando-se em consideração a corrente média dos motores de tração durante um período de 30 dias, para se evitar possíveis desvios como estar em trens carregados, vazios ou mesmo locomotivas paradas.

Os gráficos comparativos de corrente média de algumas locomotivas entre o ano que estavam circulando em outro corredor e ano de 2015 quando já estavam circulando no corredor Minas/Rio.

Essa análise foi feita comparando-se o mesmo período do ano, no mês de novembro, para evitar diferenças consideráveis em relação a temperatura ambiente que pudesse influenciar no desgaste do componente.

Segue o gráfico da corrente média dos motores de tração da locomotiva 728 no ano de 2012 (Gráfico 4.2).

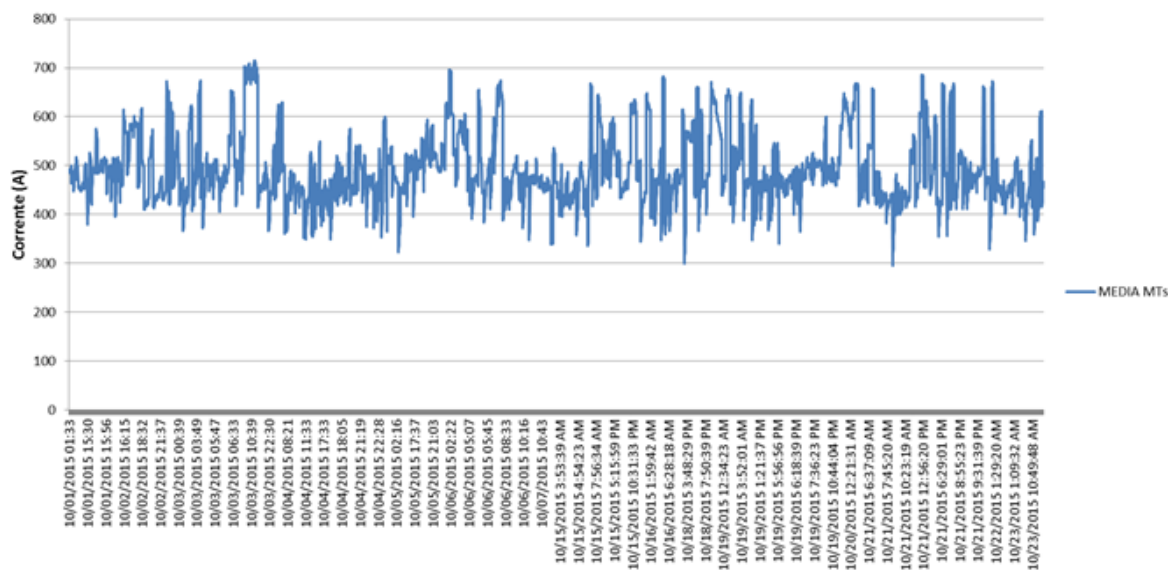
Gráfico 4.2 – Corrente média de motores de tração da locomotiva 720 em 2012



Fonte: O autor (2019).

Em 2012 a locomotiva estava circulando em outro corredor, observe que apenas em alguns momentos a corrente excede 600 Amperes. O Gráfico 4.3 apresenta os dados da corrente média da mesma locomotiva 728 no ano de 2015.

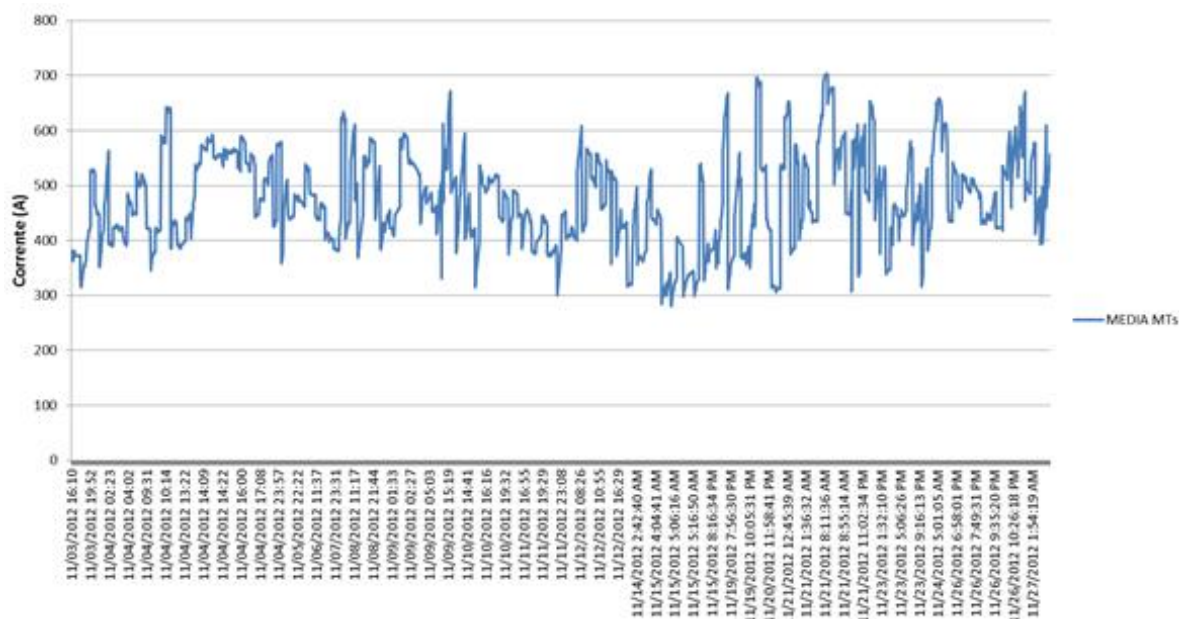
Gráfico 4.3 – Corrente média motores tração locomotiva 728 em 2015



Fonte: O autor (2019).

Em 2015 a locomotiva já estava circulando no corredor Minas/Rio, observe que por diversas vezes a corrente excede 600 Amperes, chegando em alguns casos a mais de 700 amperes. O Gráfico 4.4 apresenta os dados da corrente média da locomotiva 733 no ano de 2012.

Gráfico 4.4 – Corrente média motores tração locomotiva 733 em 2012

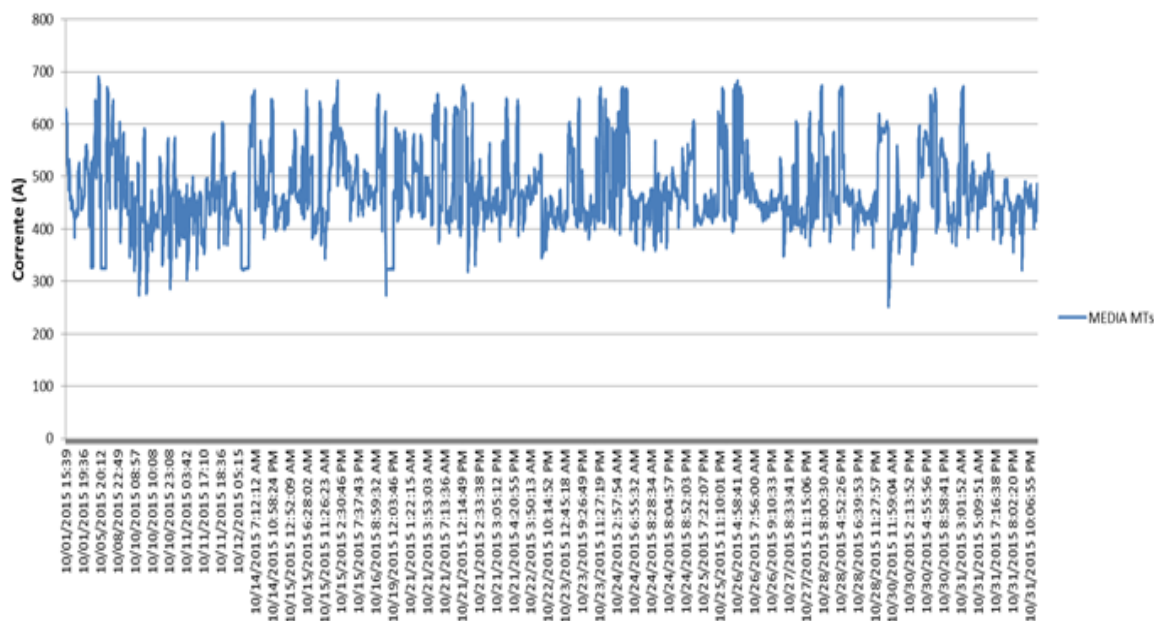


Fonte: O autor (2019).

Em 2012 a locomotiva estava circulando em outro corredor, observe que apenas em alguns momentos a corrente excede 600 Amperes.

O Gráfico 4.5 apresenta os dados da corrente média da mesma locomotiva 733 no ano de 2015.

Gráfico 4.5 – Corrente média motores tração locomotiva 733 em 2015

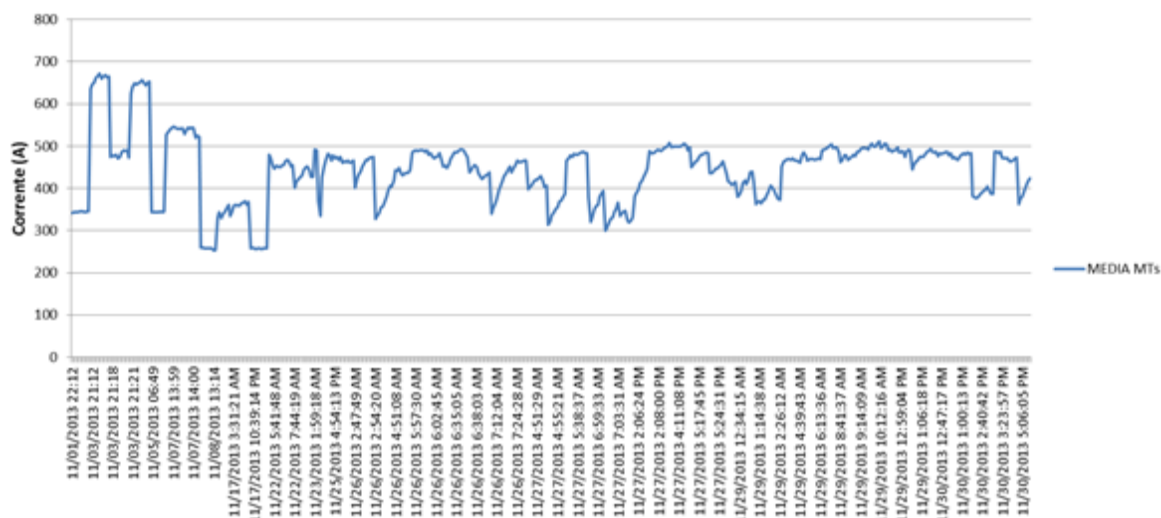


Fonte: O autor (2019).

Em 2015 a locomotiva já estava circulando no corredor Minas/Rio, observe que por diversas vezes a corrente excede 600 Amperes.

Segue o Gráfico 4.6 que apresenta os dados de corrente média da locomotiva 7486 no ano de 2013.

Gráfico 4.6 – Corrente média motores tração locomotiva 7486 em 2013

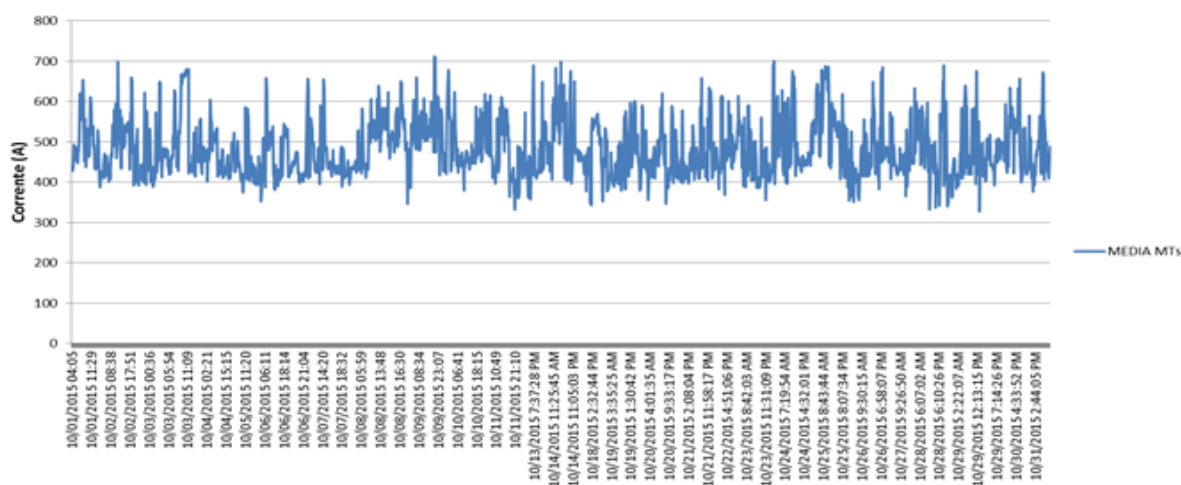


Fonte: O autor (2019).

Em 2013 a locomotiva estava circulando em outro corredor, observe que apenas em alguns momentos a corrente excede 600 Amperes.

O Gráfico 4.7 apresenta os dados da corrente média da mesma locomotiva 7486 no ano de 2015.

Gráfico 4.7 – Corrente média motores tração locomotiva 7486 em 2015



Fonte: O autor (2019).

Em 2015 a locomotiva já estava circulando no corredor Minas/Rio, observe que por diversas vezes a corrente excede 600 Amperes, chegando em alguns momentos a 700 Amperes.

Pelos gráficos demonstrados fica claro que a corrente dos motores de tração das locomotivas BB36 é maior no corredor Minas/Rio quando se comparado aos demais corredores, permanecendo por mais tempo e mais vezes com corrente acima de 600A e até mesmo acima de 700A.

Por meio dos acompanhamentos e análises realizados nos trens vazios e carregados no corredor Minas/Rio verificamos que em muitos trechos as locomotivas permanecem por muito tempo com altas correntes. Apesar de não gerar sobrecarga nos motores, os trens permanecem por até 8 minutos contínuos abaixo da velocidade mínima contínua de trabalho do ativo (VMC) estipulada para a locomotiva BB36, que é de 18KM/h, chegando a permanecer por mais de 5 minutos abaixo de 10Km/h.

As locomotivas BB36 MP possuem um sistema de controle de sobrecarga conforme Tabela 4.2 no capítulo 4.2.2.1, não deixando exceder a corrente estipulada pela engenharia, porém a baixa velocidade e alta corrente contribui e muito para a redução drástica da vida útil do motor de tração, apesar de não chegar a gerar sobrecarga nos motores de tração. Considerando o sistema de proteção vigente, significa que as locomotivas podem permanecer com corrente de até 699A independentemente do tempo.

4.5 ESTUDO CONSEQUÊNCIAS ALTA CORRENTE DOS MOTORES DE TRAÇÃO

Conforme evidências obtidas itens 4.3 e 4.4 deste trabalho, fica claro que o motivo da quantidade de motores de tração avariadas ser cerca 45% conforme item 2.1.1.1.1 quando comparado aos demais corredores de onde as locomotivas migraram, é justamente a alta corrente dos motores de tração.

Porém se faz necessário entender o “porquê” de a alta corrente dos motores de tração ser a causa da avaria dos motores de tração, pois conforme demonstrado no item 4.2.2.1 o sistema de proteção de corrente dos motores de tração está funcionando perfeitamente, sendo assim não deveria ser a causa da falha.

Um dado importante que deve ser levado em consideração é que um dos limitadores para corrente de trabalho dos motores de tração é a DENSIDADE DE CORRENTE NAS ESCOVAS.

Os motores de tração GE761 A22 e ANR utilizados na BB36 são dimensionados para trabalhos com altas correntes conforme a Tabela 4.2 apresentada no item 4.2.2.1.

O motor de tração é constituído por 4 porta escovas, sendo utilizado 2 escovas em cada um, totalizando 8 escovas por motor de tração.

Considerando que são 2 porta escovas para cada polo (Positivo/Negativo), utilizamos 4 escovas para dissipar a corrente do motor de tração.

As dimensões das escovas dos motores de tração são:

Dimensões escova - 1,9cm x 3,81cm

Sendo assim segue na equação 1, cálculo para densidade de corrente da escova:

$$\text{Densidade corrente} = \frac{\text{Corrente}}{\text{Área Contato Escova}}$$

Considerando uma corrente de 600A e que o Motor 761 GE utiliza 4 escovas temos:

$$\text{Densidade corrente} = \frac{600}{(1,9 \times 3,81)}$$

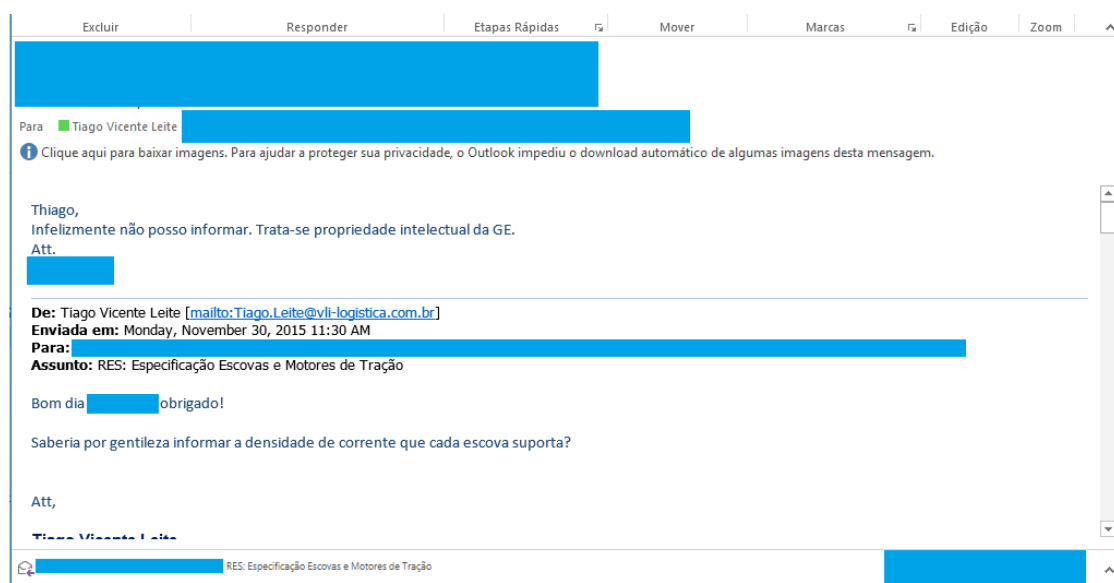
$$\text{Densidade} = 82,884376 \text{ A/cm}^2$$

$$\text{Densidade corrente} = \frac{82,884376}{4}$$

$$\text{Densidade} = 20,72 \text{ A/cm}^2$$

Foi solicitado a GE que é a fabricante do motor de tração que informasse a densidade de corrente admissível para cada escova, porém conforme Figura 4.6 a única resposta que obtivemos foi “Essa informação é propriedade intelectual da GE, não podendo ser fornecida”. Os nomes das pessoas envolvidas foram omitidos por questão de segurança.

Figura 4.6 – Retorno da GE quanto ao questionamento



Fonte: O autor (2019).

Sendo assim foi solicitado a visita da empresa Morganite que é a fabricante da escova utilizada no motor 761 GE.


No dia 16 de dezembro de 2015 os Srs Jefferson M. Gouveia e José Rubens Magalhães da empresa Morganite realizaram uma visita em Lavras/MG, para esclarecimentos sobre os problemas dos motores de tração e sobre a densidade de corrente para qual as escovas foram projetadas.

O fabricante da escova (Morganite) informou que a escova suporta uma densidade de 16A/cm², com picos de 20A/cm². Diante da informação chega-se à conclusão que a corrente máxima que as escovas suportam para regime contínuo é de 500A, com picos de 600A.

Foi solicitado a empresa Mersen, outro fabricante de escovas que também é homologada nacionalmente, para informar qual a densidade de corrente que a escova fornecida por eles para o mesmo modelo de motor de tração GE 761 suporta.

Onde resposta obtida foi de 18A/cm² em regime contínuo, sem informações em relação aos picos, conforme Figura 4.7.

Figura 4.7 – Dados técnicos escova fornecedor Mersen



CARACTERÍSTICAS FÍSICAS - APLICAÇÃO ELÉTRICA										
GRUPOS DE NUANCES	NUANCES	Densidade Aparente (g/cm ³)	Resistividade (μΩcm)	Dureza Shore C2	Ruptura Flexão (Mpa)	Queda no Contato (V)	Coefficiente de Atrito	Densidade Corrente (A/cm ²)	Velocidade Máxima (m/s)	Taxa de Metal (%)
Eletrográficas Impregnadas	EG 8220	1,82	5000	90	48	M	M	10 a 18	50	

Fonte: Mersen (2019).

Após todo o estudo foi então realizado a técnica dos “5 por que”, para analisar se realmente a causa raiz da avaria dos motores de tração foi identificado, segue no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – 5 PQ para causa raiz de falha do motor de tração

Avaria Motor de Tração		
1	Por que?	Comutador danificado
2	Por que?	Arraste de material
3	Por que?	Escovas Curtas
4	Por que?	Consumo Excessivo escovas
5	Por que?	Corrente acima do suportado pelas escovas

Fonte: O autor (2019).

Conforme o Quadro 4.2, com a utilização da técnica do 5Pq, chegou-se a causa raiz da avaria do motor de tração.

4.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi demonstrado o desenvolvimento do trabalho passo a passo, explicando cada uma das análises realizadas, foi mostrado na prática cada uma das ferramentas da confiabilidade utilizadas no desenrolar do estudo.

Esse processo é importante para entendimento do leitor.

Iniciou-se com a matriz de GUT, para auxiliar na tomada de decisão, demonstrando a necessidade real de estudo relacionado a avarias de motor de tração.

Posteriormente realizado brainstorming com as áreas envolvidas, para identificar possíveis causas de avaria do motor de tração.

Em função da quantidade de causas identificadas, foi novamente realizado um estudo da base de dados, classificando as avarias dos motores de tração por especialidades, mecânica e elétrica.

Foi realizado o diagrama de Ishikawa para organização das causas, direcionando as análises.

Foi realizado uma análise de cada uma das possíveis causas de avaria, evidenciando com dados e fatos, evidências técnicas que comprovem ou não como passível de causar a avaria do motor de tração.

Após esse passo foi identificado a principal causa de avaria do motor de tração, realizado uma análise técnica criteriosa, onde comprovou-se a causa raiz da avaria.

Esses passos são fundamentais pois é através desse capítulo que temos o embasamento técnico para conclusão do trabalho que será demonstrada no próximo capítulo.

5 CONCLUSÃO

Conforme estudo realizado, fica evidenciado que a causa do alto índice de avarias do motor de tração da frota de locomotivas BB36 no corredor Minas/Rio quando comparado aos demais corredores, se dá devido à alta corrente de trabalho dos motores de tração, em função do trecho, perfil das rampas e restrições, mesmo estando os sistemas de proteção em perfeito funcionamento.

O fabricante do motor de tração (GE) garante que o motor 761 A22 e ANR suportam correntes acima de 600A, porém os fabricantes de escovas informam que as escovas não suportam a corrente mencionada pelo Fabricante do Motor.

Em outros corredores de onde as locomotivas foram migradas não haviam tantas avarias devido a corrente dos motores estarem muito próximas do limite suportado pelas escovas, que é algo entorno de 600A, o que gera uma densidade de aproximadamente 20A/cm², isso devido ao trecho que é extremamente agressivo, com muitas rampas longas com inclinações altas, isso sem considerar a quantidade de restrições.

Conforme demonstrada a densidade de corrente no corredor Minas Rio é cerca de 20% maior que a máxima admitida pelas escovas.

Para a solução em definitivo dos problemas temos que diminuir a densidade de corrente das escovas, para isso temos 5 possibilidades:

- a) Aumentar a área de contato entre escovas e comutador, alterando o projeto original e instalando escovas de dimensão maior;
- b) Redução do quadro de tração, reduzindo a quantidade de vagões transportados por cada locomotiva, dessa forma teremos a redução do esforço e conseqüentemente uma redução na corrente dos motores de tração;
- c) Investimento pesado na via para modificar o trecho, reduzindo as restrições, aumentando a velocidade de circulação, reduzindo o percentual de inclinação das rampas, para que permita que os trens desenvolvam uma maior velocidade, evitando assim correntes elevadas;
- d) Assumir o risco e continuarmos com alto consumo de escovas e de motores de tração;

- e) Alterar software para que reduza os valores de corrente para proteção dos motores de tração, porém essa alteração resultara em redução de quadro de tração, pois reduziremos o esforço trator das locomotivas.

Porém para efeito de mitigar as falhas foram traçadas algumas ações:

- a) Reduzir o limite de condenação das escovas dos motores de tração em 30% na realização das preventivas, dessa forma evitaremos a avaria precoce do motor de tração em função de escova curta, em consequência teremos o aumento no consumo de escovas;
- b) Auditorias constantes nas inspeções e intervenções dos motores de tração dos especialistas e técnicos especializados;
- c) Análise de trechos críticos onde locomotivas permanecem com correntes elevadas, para mapear oportunidades para retiradas de restrição e aumento da velocidade.

5.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE ALTERAÇÃO PROJETO MOTOR GE761

Foi realizado um estudo referente a viabilidade de modificação do projeto do motor GE761, conforme mencionado no capítulo 5.

Foi verificado com a empresa Mersen uma proposta para desenvolver um projeto para modificação dos porta escovas, com objetivo de aumentar a área de contato entre a escova e o comutador, resultando em uma densidade de corrente para o qual as escovas foram projetadas.

O projeto consiste em trocar os 4 porta escovas por outros com dimensões maiores, dessa forma teríamos a utilização de escovas com dimensões maiores, reduzindo a densidade de corrente para níveis aceitáveis ao qual as escovas suportem.

Tomando como base o valor do Preço Médio Unitário de manutenção dos motores de tração temos:

- a) Custo médio PMU motores de tração para corredor – R\$18.000,00;
- b) Custo transporte (frete Divinópolis x Lavras) – R\$669,50;
- c) Custo transporte (frete Lavras x Divinópolis) – R\$572,34.

Os custos mencionados são apenas custos diretos, sendo que os caminhões geralmente são carregados todas as quintas-feiras em Divinópolis e nas sextas-feiras

são descarregados em Lavras. Em média temos 4 motores entregues todas as sextas-feiras, ou seja, esse espaço poderia ser utilizado com outros componentes.

Pode-se ainda mencionar os custos indiretos como:

- a) Tempo de trem parado devido avaria de motor de tração;
- b) Deslocamento de mecânico para diagnóstico no trecho;
- c) Tempo de loco imobilizada aguardando diagnóstico em oficina;
- d) Mão de obra em pesquisa de avaria e troca de motor de tração;
- e) Mão de obra para controle, movimentação e envio de componente.

Foi realizado um orçamento inicial para testes com novos porta escovas. Vale ressaltar que o valor mencionado é o inicial para realização dos testes, contempla o fornecimento de 2 modelos de escovas com objetivo de acompanhar qual escova terá melhor desempenho, o desenvolvimento do projeto e da ferramenta para confecção do porta escovas.

Após os testes a tendência é que o custo para fornecimento dos porta escovas seja menor, sendo que ainda existe a possibilidade da Mersen aceitar os porta escovas antigos como parte do pagamento.

Levando em consideração o valor inicial para realização dos testes, podemos concluir que o custo para modificação dos porta escovas em 1 locomotiva (32 porta escovas), mais as escovas para uma locomotiva (32 escovas de cada modelo, total de 64 escovas), é menor que o custo direto do PMU de um motor de tração.

- a) Custo PMU motor de tração – R\$18.000,00;
- b) Custo inicial para alteração de uma locomotiva por completo – R\$17.440,00.

Se obtiver a redução no consumo de 2 motores de tração por mês, praticamente já teria o retorno do investimento em 1 ano, isso levando em consideração apenas os custos diretos do PMU do motor, sem levar em consideração os custos indiretos.

Considerando que o custo para alteração dos porta escovas seja o mencionado no orçamento temos:

- a) Custo para alteração de toda frota (26 locomotivas) – R\$453.440,00;
- b) Custo direto PMU de 2 motores de tração por mês durante 1 ano – R\$432.000,00.

Com essa alteração temos a possibilidade de:

- a) Retorno do investimento em 1 ano;

- b) Posteriormente economia de R\$432.000,00/ano apenas em custos diretos com a baixa dos motores de tração.

Tomando como base o relatório podemos concluir que o teste se torna viável, devido à grande possibilidade de economia que pode gerar para a empresa como um todo.

5.1.1 Benchmarking

Foi verificado no mercado se existe algum estudo relacionado ao motor GE761. Através da verificação junto aos fornecedores de escovas e motores de tração, foi identificado um estudo realizado pela Vale que identificou os mesmos problemas nos motores de tração GE761, porém em uma frota diferente de locomotivas, a DASH9, que é um modelo mais novo.

Foi realizado o contato com a empresa Vale, com o engenheiro responsável pelo projeto (não pode ser citado o nome), onde foi obtido a informação de que irão realizar um teste com novos porta escovas que serão desenvolvidos pela empresa Mersen, que permitem a utilização de escovas com dimensões maiores, com objetivo de se atingir a densidade de corrente para qual as escovas foram projetadas.

Dessa forma tem-se mais uma comprovação de que o estudo realizado e a solução proposta estão corretos.

5.2 PROPOSTA PARA NOVOS ESTUDOS

- a) Realizar um estudo de consumo de escovas de motor de tração, para identificar o tempo ótimo para troca, bem como o teste com outros fornecedores com objetivo de verificar qual fornecedor terá o menor consumo de escovas;
- b) Realizar a modificação conforme projeto proposto, acompanhar o desempenho para validação definitiva da melhoria.

REFERÊNCIAS

- CAMARGO, Renata Freitas de. Como fazer a matriz GUT para a resolução de problemas? Conheça a matriz GUT de prioridades. **Treasy**, 9 fev. 2018. Disponível em: <<https://www.treasy.com.br/blog/matriz-gut/>>. Acesso em: 30 out. 2019.
- DIONATA, L. P. **Manual do usuário**. Diagnóstico de falhas, parâmetros e alarmes – BB36. Sistema de automação para locomotiva SAL 05. Curitiba: ZEIT, 2013.
- EMPRESA VLI. **Dados do Grupo de Análise de Falhas**. 2015.
- GENERAL ELECTRIC BRASIL. **Manual Conjunto Motor/Rodeiro**. GEI-EP-56553C. [S.I.]: GE, 1982.
- GERÊNCIA MECÂNICA. **Treinamento de PML's**. Módulo I – Eletricidade de locomotivas. [S.I.]: ALL, 2009.
- MARCONDES, José Sérgio. Diagrama ou gráfico de Pareto: Ferramenta da gestão de qualidade. **Blog Gestão de Segurança Privada**, 2019. Disponível em: <<https://gestaodesegurancaprivada.com.br/diagrama-ou-grafico-de-Pareto-conceito>>. Acesso em: 30 out. 2019.
- MERSEN. **Dados técnicos escova Modelo T900**. 2019.
- OS 5 PORQUÊS (5 why) – Análise da causa raiz. **Qualidade Total**. 18 fev. 2014. Disponível em: <<https://www.apostilasdaqualidade.com.br/os-5-porques-5-why-analise-da-causa-raiz/>>. Acesso em: 30 out. 2019.
- OSBORN, Alex. **Unlocking your creative**: How to use your imagination to brighten life, to get ahead. New York: Hamilton Books, 2009.
- RIGONI, Emerson. **Métodos para análises de falha**. Apostila. Especialização em Engenharia da Confiabilidade. [S.I.]: UTFPR, 2019.
- ROVEDA, Vinícius. Como o Diagrama de Ishikawa contribui com a gestão da empresa. **Conta Azul Blog**, 11 set. 2017. Disponível em: <<https://blog.contaazul.com/diagrama-de-ishikawa> >. Acesso em: 30 out. 2019.
- SERRAT, Oliver. The five whys technique. In: SERRAT, Oliver. **Knowledge Solutions**. Mandaluyong: Asian Development Bank, cap. 32, 2017.

APÊNDICE A – BANCO DE DADOS GRÁFICO 2.1

Tabela 6.1 – Banco de dados Gráfico 2.1

	Avarias	Reboques
Motor de Tração	145	26
Controle de Excitação	46	8
Conjunto de Força	45	25
Computador e Módulos Digitais	44	5
Contator de Potência	36	2
Controle de Aderência	36	
Ventilador Mecânico	34	13
Tubulação/Mangueira	32	4
Governador	29	7
Conjunto Roda	27	16
Bancada Retificadora	23	20
Sm informação	1	
Compressor		5
Eixo Virabrequim		4
TOTAL	498	135

Fonte: O autor (2019).

APÊNDICE B – BANCO DE DADOS GRÁFICO 2.2

Tabela 0.1 – Banco de dados Gráfico 2.2

	KMEF	MKBF
Motor de Tração	29	19
Controle de Excitação	9	6
Conjunto de Força	9	19
Computador e Módulos Digitais	9	4
Contator de Potência	7	1
Controle de Aderência	7	0
Ventilador Mecânico	7	10
Tubulação/Mangueira	6	3
Governador	6	5
Conjunto Roda	5	12
Sm informação	0	0
Compressor	0	4
Eixo Virabrequim	0	3
TOTAL	498	135

Fonte: O autor (2019).

APÊNDICE C – BANCO DE DADOS GRÁFICO 2.3

Tabela 6.1 – Banco de dados Gráfico 2.3

	KMEF 2014	KMEF 2015
Motor de Tração	77	68
Controle de Excitação	30	16
Conjunto de Força	26	19
Computador e Módulos Digitais	25	19
Contator de Potência	20	16
Controle de Aderência	14	22
Ventilador Mecânico	20	14
Tubulação/Mangueira	15	17
Governador	29	
Conjunto Roda	7	20
Bancada Retificadora	10	13
Sem informação	0	1

Fonte: O autor (2019).

APÊNDICE D – BANCO DE DADOS GRÁFICO 2.4

Tabela 6.1 – Banco de dados Gráfico 2.4

	MKBF 2014	MKBF 2015
Motor de Tração	14	12
Controle de Excitação	8	0
Conjunto de Força	13	12
Computador e Módulos Digitais	5	0
Contator de Potência	0	2
Ventilador Mecânico	8	5
Tubulação/Mangueira		4
Governador	4	3
Compressor	5	0
Conjunto Roda	7	9
Eixo Virabrequim	1	3

Fonte: O autor (2019).

APÊNDICE E – BANCO DE DADOS GRÁFICO 2.5

Tabela 0.1 – Banco de dados Gráfico 2.5

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Meta	15	7	0	10	11	8	14	14	12	12	12	11
Real	12	3	12	13	16	15	16	20	20	19	19	18

Fonte: O autor (2019).

APÊNDICE F – BANCO DE DADOS GRÁFICO 4.1

Tabela 0.1 – Banco de dados Gráfico 4.1

	KMEF	MKBF
Elétrica	60	8
Truque	8	4

Fonte: O autor (2019).