

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA FERROVIÁRIA E METROVIÁRIA

GLAUBER STERDI LUIZ

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS EM ITEM  
CRÍTICO DOS MOTORES DE TRACÇÃO DE LOCOMOTIVAS

Joinville

2018

GLAUBER STERDI LUIZ

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS EM ITEM  
CRÍTICO DOS MOTORES DE TRAÇÃO DE LOCOMOTIVAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Ferroviária e Metroviária, da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Régis Kovacs Scalice

Joinville

2018

GLAUBER STERDI LUIZ

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHA EM ITEM  
CRÍTICO DOS MOTORES DE TRACÇÃO DE LOCOMOTIVAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ferroviária e Metroviária, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

**Banca Examinadora:**

---

Dr. Régis Kovacs Scalice  
Orientador  
Presidente

---

Dr. Yesid Ernesto Asaff Mendoza  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Marcus Vinicius Volponi Morteau  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais e a minha avó.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Lúcia e Dalmo, por sempre me apoiarem, acreditarem em mim e me incentivarem a correr atrás dos meus sonhos.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Régis Kovacs Scalice, por confiar em mim e me auxiliar na escolha do tema. Suas contribuições foram fundamentais para realização deste trabalho.

Agradeço à operadora ferroviária por ter fornecido os dados, tornando possível a realização deste trabalho.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia Ferroviária e Metroviária por todo conhecimento compartilhado.

À minha família e amigos por todo o apoio e por sempre torcerem por mim.

## RESUMO

O setor ferroviário, como as outras áreas da indústria brasileira, está em constante busca pelo aumento da eficiência dos seus ativos. Para isso, surge a necessidade de implementação de ferramentas que auxiliam na identificação e prevenção de falhas. Segundo os dados fornecido por uma operadora ferroviária, o item que apresenta maior número de falhas nas locomotivas é o motor de tração. Este elevado número de ocorrências se deve as condições de operação que este item está sujeito, e pode causar problemas na operação das empresas do setor, consumindo um alto volume de recursos e de capital. Com isso, surge a necessidade de um estudo visando prevenir estas ocorrências. Este trabalho propõe uma análise destes motores, baseado nos dados de falhas ocorridas no período de 2009 a 2016 fornecidos por uma operadora ferroviária, visando encontrar o item dos motores de tração que apresentou o maior número de falhas para a aplicação da metodologia de Análise de Árvore de Falhas, com o intuito de encontrar suas causas raízes e propor possíveis propostas de soluções para estas. Após as análises, foi detectado que o item dos motores de tração que apresentou maior número de falhas no período estudado foi o pinhão e sua principal causa raiz está relacionada a erros de mão de obra tanto na instalação como na recuperação do componente. Assim, foram propostas possíveis soluções para que este problema seja reduzido.

**Palavras chaves:** Motor de Tração. Análise de Árvore de Falha. Confiabilidade. Pinhão.

## **ABSTRACT**

The rail sector, like other areas of Brazilian industry, is in constant search for increased efficiency of its assets. For this, the need arises to implement tools that help in the identification and prevention of failures. According to the data provided by a railway operator, the item that has the highest number of failed in locomotives is the traction motor. This high number of occurrences is due to the operating conditions that this item is subject, and can cause problems in the operation of the companies of the sector, consuming a high volume of resources and capital. With this, the need arises for a study to prevent these occurrences. This work proposes an analysis of these engines, based on the data of failures occurred in the period from 2009 to 2016 provided by a railway operator, aiming to find the item of traction motors that presented the highest number of failures for the application of Fault Tree Analysis methodology, with the intention of find its root causes and to propose possible solutions to them. After the analysis, it was detected that the item of the motors of traction that presented highest number of failures in the period studied was the pinion and its main root cause is related to manpower errors both in installation as the component recovery. Thus, possible solutions have been proposed to reduce this problem.

**Keywords:** Traction Motor. Fault Tree Analysis. Reliability. Pinion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura da FTA.....	16
Figura 2 - Eventos de entrada e saída em uma porta lógica. ....	18
Figura 3 – Estrutura da FTA para o Exemplo 1. ....	23
Figura 4 - Diagrama de Pareto das falhas dos sistemas das locomotivas.....	25
Figura 5 - Diagrama de Pareto dos conjuntos do sistema de propulsão das locomotivas. ....	26
Figura 6 - Motor de tração de corrente contínua. ....	27
Figura 7 - Armadura do motor de tração de corrente contínua. ....	28
Figura 8 - Pinhão e engrenagem. ....	29
Figura 9 - Diagrama de Pareto dos Itens do motor de tração. ....	30
Figura 10 - Pinhão montado na ponta do motor de tração.....	31
Figura 11 - Pinhão trincado. ....	32
Figura 12 - Evento topo e seus eventos intermediários de primeiro nível. ....	34
Figura 13 - Causas do evento “Excessiva temperatura de operação”.....	34
Figura 14 - Causas do evento “Falha na instalação”. ....	35
Figura 15 - Causas do evento “Falhas no processo de reaproveitamento”.....	35
Figura 16 - Causas do evento "Falha nas propriedades do material". ....	36
Figura 17 - Causas do evento “Excesso de carga aplicada no pinhão”. ....	36
Figura 18- Exemplo de Árvore de Falhas.....	38
Figura 19 - Matriz final do exemplo da aplicação conjunto de cortes mínimos. ....	38
Figura 20 - Diagrama de corte mínimos da FTA dos pinhões.....	39
Figura 21 - Número de falhas dos pinhões dos motores de tração de 2009 a 2016. ....	40

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Portas Lógicas. ....	18
Quadro 2 – Simbologia e descrição dos eventos. ....	20
Quadro 3 – Equacionamento da álgebra booleana aplicada na árvore de falhas.....	21
Quadro 4 – Propriedades da álgebra booleana. ....	22
Quadro 5 - Características dos motores de tração. ....	29

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Modos de Falhas dos Pinhões. ....	33
Tabela 2 - Causas de falhas nos pinhões de 2009 a 2016.....	41

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1.	JUSTIFICATIVA.....	12
1.2.	OBJETIVOS.....	12
<b>1.2.1.</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2.2.</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>12</b>
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>13</b>
2.1.	ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE .....	13
2.2.	MÉTODOS UTILIZADOS NA ANÁLISE DE FALHA .....	14
<b>2.2.1.</b>	<b>FTA .....</b>	<b>14</b>
2.2.1.1.	Desenvolvimento da FTA .....	16
2.2.1.2.	Portas Lógicas .....	17
2.2.1.3.	Eventos .....	19
2.2.1.4.	Análise Qualitativa.....	20
2.2.1.5.	Análise Quantitativa.....	22
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
<b>4.</b>	<b>ANÁLISE DAS FALHAS EM LOCOMOTIVAS.....</b>	<b>25</b>
4.1.	MOTOR DE TRAÇÃO.....	27
4.2.	ANÁLISE DE FALHAS NOS MOTORES DE TRAÇÃO .....	30
<b>4.2.1.</b>	<b>Pinhão.....</b>	<b>30</b>
<b>5.</b>	<b>APLICAÇÃO DA FTA .....</b>	<b>33</b>
5.1.	CONJUNTO CORTES MÍNIMOS.....	37
5.2.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	40
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>44</b>
	<b>ANEXO A – CABEÇALHO DA PLANILHA DE DADOS DA OPERADORA FERROVIÁRIA .....</b>	<b>46</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria brasileira tem passado por grandes desafios nos últimos anos com os avanços tecnológicos nos países desenvolvidos, alta concorrência atrelada a um baixo custo de produção dos países asiáticos, globalização dos mercados e a crise econômica nacional. Tendo em vista estes desafios, a indústria nacional tem buscado otimizar seus recursos visando o aumento de desempenho na busca de alta eficiência dos operadores, zero defeito, maior disponibilidade de seus ativos e baixo custo de produção (SCHMITT, 2013).

Este cenário também se apresenta para o setor ferroviário, principalmente quando se refere às operadoras de transporte de cargas, que estão constantemente em busca de aumento da eficiência e da vida útil de seus ativos. Para isso, surge a necessidade de implementação de ferramentas para auxiliar na identificação e prevenção de falhas dos ativos.

A manutenção desempenha papel fundamental no transporte ferroviário, sendo responsável por manter a disponibilidade da via permanente, vagões e veículos de tração. Neste último, representado no Brasil em sua maioria por locomotivas diesel-elétricas, o item que apresenta maior número de falhas, de acordo com os números fornecidos por uma operadora ferroviária, é o motor de tração. Isto se deve ao intenso regime de trabalho imposto sobre estes, grandes variações de corrente, aliada à presença de umidade, minérios, vibrações e poeira, características consideradas agressivas para seu funcionamento (DALMASO, 2010).

Segundo Vieira e Pacova (1999), a manutenção dos motores de tração necessita de grande quantidade de mão de obra e de material, além de ser responsável por deter as locomotivas nas oficinas por grandes tempos, consumindo assim alto volume de recursos e capital. Isto se deve a alguns elementos apresentarem vida útil relativamente baixa, a idade avançada de algumas locomotivas presentes na frota e a necessidade de grande quantidade de homens-hora para realização do trabalho. Além disso, o elevado custo de aquisição de novos motores gera picos de investimentos, quando há necessidade de substituição de muitos destes dentro em curto período de tempo.

Neste contexto, surge a importância de avaliação dos motores de tração, aplicando ferramentas de análise de falhas de ativos, com o intuito de buscar as raízes das falhas que venham a ocorrer. Portanto, este trabalho de estudo de caso propõe uma análise das falhas nos

motores de tração, baseado no histórico de falhas fornecido por uma operadora ferroviária, visando encontrar o item mais crítico para aplicação do método análise de árvore de falhas.

## 1.1. JUSTIFICATIVA

O que motivou a realização deste trabalho foi que segundo os dados obtidos junto a uma operadora ferroviária o conjunto das locomotivas que apresentou maior número de falhas no período de 2009 a 2016 foi os motores de tração com 1328 falhas. Assim, sabendo que essa empresa está em constante busca de melhorias na eficiência e na vida útil de seus ativos, surge a necessidade de um estudo visando encontrar as possíveis causas que geraram este elevado número de ocorrências.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo Geral

Encontrar e analisar as causas raízes do item que apresentou o maior número de falhas nos motores de tração das locomotivas utilizadas pela operadora ferroviária.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

Este trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- Definir a técnica de análise de falhas utilizada, a Análise de Árvore de Falhas (FTA);
- Analisar as falhas nos motores de tração, visando encontrar o item que apresenta o maior número de falhas;
- Elaborar a FTA deste item crítico, utilizando os dados de falhas em locomotivas fornecidos pela operadora ferroviária;
- Fazer uma análise qualitativa da FTA, aplicando o método do conjunto de cortes mínimos, visando encontrar quais foram as causas raízes que geraram as falhas durante o período estudado;
- Apresentar propostas de soluções para as causas identificadas.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

As metodologias utilizadas na detecção e análise de falhas têm grande aplicabilidade na indústria, podendo resultar em aumento da vida útil dos ativos, melhora do desempenho de produtos, otimização dos recursos da empresa, redução dos custos envolvendo paradas inesperadas, entre outros benefícios (BACELO; PERREIRA, 2016).

A área da engenharia que analisa falhas e suas consequências é denominada Engenharia de Confiabilidade (BACELO; PERREIRA, 2016). Esta leva ao conhecimento do desempenho dos ativos de produção e as oportunidades de melhoria.

Segundo Mendes et al. (2014), a Engenharia de Confiabilidade oferece ferramentas teóricas e práticas que permitem especificar, projetar, testar e demonstrar a probabilidade e a capacidade com que os componentes, equipamentos e sistemas, desempenharão suas funções, por períodos determinados de tempo, em ambientes específicos. A confiabilidade de um processo tem impacto direto na qualidade do produto, sendo que um processo menos confiável necessitará intervenções mais frequentes, aumentando os custos de operação da empresa.

As principais responsabilidades da Engenharia de Confiabilidade é identificar as falhas potenciais e prevenir a ocorrência destas falhas (RAUSAND; HOYLAND, 2004). Estão entre as principais aplicações da Engenharia de Confiabilidade a possibilidade de identificar problema repetitivos em equipamento, suas causas raízes e as recomendações para eliminá-las (MENDES et al., 2014).

Os conceitos de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade estão diretamente relacionados com a Engenharia de Confiabilidade, sendo que a norma brasileira NBR 5462 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1994) os define da seguinte forma:

- **Confiabilidade:** “Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo” (p. 3);
- **Mantenabilidade:** “Capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a

manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos” (p. 3);

- **Disponibilidade:** “Capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados” (p. 2).

As etapas de detecção, análise de falhas e posterior elaboração de procedimentos visando impedir a recorrência das mesmas, estão diretamente relacionadas com a confiabilidade do produto ou serviço de determinada organização (FAGUNDES, 2005).

Dhillon (2003) apresenta em seu trabalho nove diferentes métodos e aproximações úteis que tem como objetivo garantir a confiabilidade humana e a análise de erros: Análise do Efeito e Modo de Falhas (FMEA - Failure mode and effect analysis), Análise da Causa de Origem (RCA- Root Cause Analysis), Análise de Árvore de Falhas (FTA - Fault Tree Analysis), Diagrama de Causa e Efeito (CAED - Cause and Effect Diagram), Estudo do Risco de Funcionamento (HAZOP- Hazard Operability Study), Método da Árvore de Probabilidade, Programa de Remoção de Causa e Erro (ECRP - Error Cause Removal Program), Análise de Sistemas de Homem-Máquina (MMSA - Man-machine Systems Analysis) e o Método de Markov (The Markov Method).

## 2.2. MÉTODOS UTILIZADOS NA ANÁLISE DE FALHA

Dentre os métodos mais utilizados na análise de confiabilidade estão a FMEA e a FTA, sendo este último o método empregado no desenvolvimento deste trabalho. Araújo et al (2001), explica que essa utilização se deve provavelmente ao fato destas técnicas serem as únicas citadas textualmente nas normas ISO 9000, em particular na ISO 9004 (gestão da qualidade), subitem 8.4 – Qualificação e Validação de Projeto.

### 2.2.1. FTA

A Análise da Árvore de Falha (FTA), é uma técnica gráfica dedutiva estruturada em termos de eventos ao invés de componentes (EBELING,1997). Esta ferramenta permite uma ampla variedade de análises de sistemas, desde os mais simples até os mais complexos. Além disso, pode ser utilizada para a análise da confiabilidade e/ou melhorias, mas de uma forma

geral, na determinação das causas potenciais de um acidente ocorrer ou de um sistema complexo falhar (BORBA PRÁ, 2010).

A FTA foi desenvolvida em 1962 por H. A. Watson dos laboratórios Bell Telephone, que a utilizou para análise do sistema de lançamento do míssil intercontinental Minuteman (RAUSAND; HOYLAND, 2004). Em 1965, foram publicados os primeiros artigos relacionados à FTA no Simpósio de Segurança, que foi patrocinado pela Boeing e a Universidade de Washington (ERICSON, 1999).

Segundo Ericson (1999), a técnica FTA é utilizada normalmente em aplicações de alto risco onde é necessária uma avaliação da probabilidade de ocorrência de falha. No entanto, o FTA tem provado o seu valor tanto para aplicações quantitativas e qualitativas. Algumas das razões mais comuns pelas quais a FTA é utilizada são:

- Verificação de requisitos numéricos;
- Identificação de componentes críticos de segurança;
- Certificação do produto;
- Avaliação do risco do produto;
- Análise de acidentes / incidentes;
- Avaliação da mudança de projeto;
- Diagramas visuais de eventos de causa-consequência;
- Análise de causa comum.

De acordo com Dias et al. (2013), a FTA é uma técnica dedutiva (de pensamento reverso), que parte de um evento inicial que se quer analisar, chamado de evento topo, identificam-se os eventos intermediários resultantes da associação lógica das causas básicas ou raízes, que geraram o evento de topo. A análise dos eventos intermediários segue até que se tenha identificado as causas básicas que resulta o evento de topo, ponto onde se tem o limite de resolução da FTA. A estruturação e a combinação das causas que resultarão no evento de topo são feitas através de operadores lógicos utilizados na análise de álgebra booleana, em portas lógicas do tipo: *E*, *OU* etc. Sendo assim, a FTA permite tanto a análise qualitativa da relação causa-efeito quanto à análise quantitativa, a partir da determinação da probabilidade de ocorrência das causas básicas e de seu relacionamento lógico, os quais definirão a probabilidade de ocorrência do evento de topo.

Segundo Hong (2011), as principais vantagens da utilização desta técnica são:

- Permitir fácil identificação visual dos eventos que causam o evento topo;
- Identificar as causas do evento;
- Resumir de maneira simples os fatores que causam o evento;

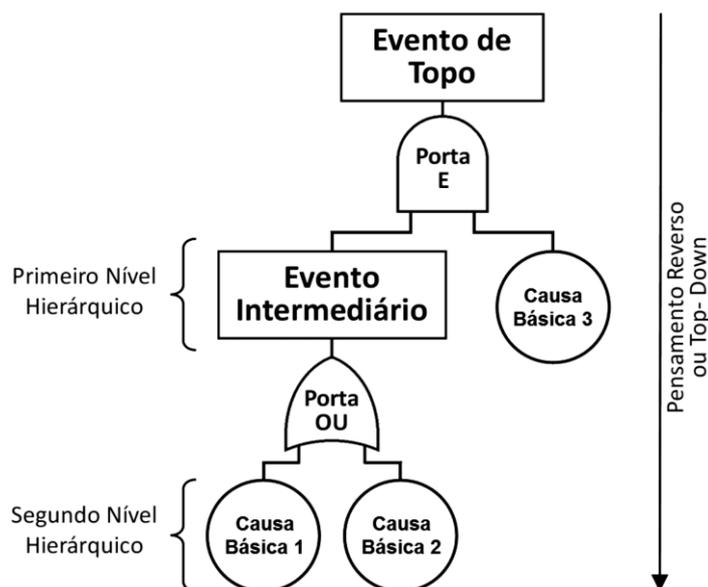
- Permitir a familiarização com o objeto de estudo.

#### 2.2.1.1. Desenvolvimento da FTA

No desenvolvimento da FTA pode-se considerar qualquer causa pertinente que leve ao evento topo, como: eventos naturais, falha de equipamentos ou erro humano. Entretanto, é importante salientar que o analista deve considerar apenas as causas de maior significância, desprezando as irrelevantes.

A estrutura básica da FTA é apresentada na Figura 1, onde possível visualizar o evento de topo, localizado no ponto mais alto da árvore e um evento intermediário cuja combinação lógica das causas básicas resulta no evento de topo. Na base da árvore de falhas estão as causas básicas as quais devem ser controladas visando eliminar os eventos intermediários que conduzem ao evento de topo ou efeito indesejado sob análise. Esta forma de estruturação da árvore de falhas é denominada de pensamento reverso ou *topdown*, uma vez que, inicia-se com o evento de topo e, a partir dele, é feito um desdobramento em demais falhas, que são as causas básicas, que individualmente ou em conjunto, podem gerar o evento de topo, ocasionando a falha do sistema (DIAS et al., 2013).

Figura 1 – Estrutura da FTA.



Fonte: Dias et al. (2013, p. 139).

Segundo Araújo et al. (2000), as etapas para realização de uma FTA consistem em:

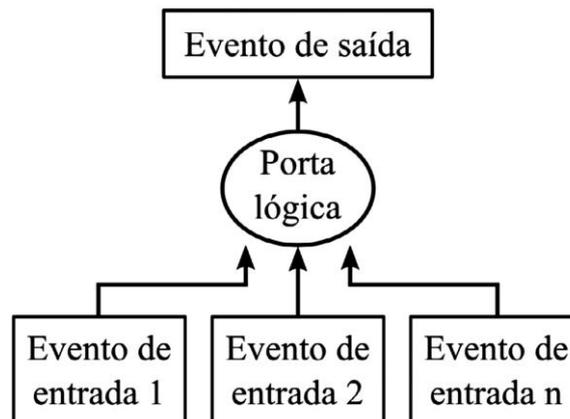
- Definir o evento de topo: o evento de topo é considerado um estado anormal do sistema. Para defini-lo são necessários relatos de falhas ocorridas no campo, falhas potenciais, principalmente aquelas relacionadas com a segurança dos usuários;
- Entender o sistema: para analisar a árvore de falhas é necessário ter conhecimento da estrutura do sistema, bem como seu esquema de funcionamento;
- Construir a árvore de falhas: nesta etapa aplica-se todo o conhecimento obtido sobre o sistema. As informações adquiridas devem ser reunidas e organizadas de forma a representar a inter-relação entre as partes que possam acarretar o evento de topo;
- Avaliar a árvore de falhas: esta etapa tem como objetivo o cálculo da probabilidade de ocorrência do evento de topo, isto é, realização da análise quantitativa e análise qualitativa;
- Implementar ações corretivas: Esta última etapa tem como objetivo o planejamento e execução de ações corretivas para aumentar a confiabilidade dos itens que apresentaram baixa confiabilidade na etapa anterior.

Na construção da FTA são utilizados símbolos para representar os eventos intermediários e de topo, as portas lógicas e as causas básicas, além de outros símbolos específicos para representação e organização das informações pertinentes que se quer evidenciar. Esta simbologia é baseada em algumas convenções normatizadas, como a norma IEC 61025 (*Fault Tree Analysis*), ou então manuais elaborados para desenvolvimento da FTA, como é o caso do NUREG-0492 (Risk Assessment Review Group Report – Fault Tree Handbook) e do manual proposto pela NASA (Fault Tree Handbook with Aerospace Applications). (DIAS et al., 2013).

#### 2.2.1.2. Portas Lógicas

As portas lógicas têm como função conectar os eventos de acordo com suas relações causais. Os eventos de entrada são conectados na parte inferior da porta lógica enquanto que o evento de saída situa-se na parte superior, como pode ser observado na Figura 2. Algumas portas lógicas podem apresentar mais de um evento de entrada, porém todas apresentam apenas um evento de saída (SAKURADA, 2001).

Figura 2 - Eventos de entrada e saída em uma porta lógica.

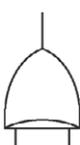


Fonte: Sakurada (2001, p. 54).

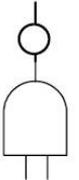
O Quadro 1 apresenta de forma resumida as principais portas lógicas utilizadas na elaboração da FTA, com base no anexo A da IEC 61025. A última coluna apresenta a probabilidade de ocorrência do evento de saída (Probabilidade de Falha,  $F(t)$ ) das respectivas portas lógicas, podendo assim ser utilizada na análise quantitativa da árvore de falha. Com a determinação da probabilidade de ocorrência do evento  $F_T(t)$  e, considerando que as causas básicas são independentes, é possível calcular a confiabilidade  $R_T(t)$  do sistema que está sendo analisado a partir da Equação 1.

$$R_T(t) = 1 - F_T(t) \quad [1]$$

Quadro 1 - Portas Lógicas.

Símbolo	Nome da Porta	Descrição	Probabilidade de ocorrência do evento de saída $F(t)$	Número de entradas
	OU	O evento de saída ocorre quando ao menos um evento de entrada ocorrer.	$F(t) = 1 - \prod_{i=2}^n [1 - F_i(t)]$	$\geq 2$
	OU Exclusivo	O evento de saída ocorre se apenas um evento de entrada ocorre.	$F(t) = F_1(t) \cdot [1 - F_2(t)]$	2
	NOR	O evento de saída só ocorre se nenhum evento de entrada ocorrer.	$F(t) = \prod_{i=2}^n [1 - F_i(t)]$	$\geq 2$

Quadro 1 (Continua) – Portas Lógicas.

Símbolo	Nome da Porta	Descrição	Probabilidade de ocorrência do evento de saída F(t)	Número de entradas
	E	O evento de saída ocorre se todos os eventos de entrada ocorrerem.	$F(t) = \prod_{i=2}^n F_i(t)$	$\geq 2$
	NAND	O evento de saída só ocorre se pelo menos um dos eventos de entrada não ocorrerem.	$F(t) = \prod_{i=1}^k [1 - F_i(t)] \cdot \prod_{j=k}^{n-k} [F_j(t)]$	$\geq 2$
	Inibição	O evento de saída só ocorre quando ocorrem simultaneamente o evento de entrada (F <sub>E</sub> ) e um evento condicional (F <sub>C</sub> ).	$F(t) = F_E \cdot F_C$	2
	NOT	O evento de saída só ocorre se o evento de entrada (F <sub>E</sub> ) não ocorrerem.	$F(t) = 1 - F_E$	1

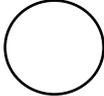
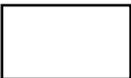
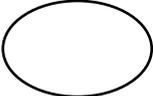
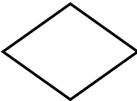
Fonte: IEC, 2006.

As equações de determinação da probabilidade de ocorrência do evento de saída F(t) são válidas apenas quando a ocorrência de um evento não afeta a probabilidade de ocorrência do outro.

#### 2.2.1.3. Eventos

O Quadro 2 apresenta a simbologia dos principais eventos comumente utilizados na elaboração da FTA com suas respectivas descrições, com base no anexo A da IEC 61025.

Quadro 2 – Simbologia e descrição dos eventos.

Símbolo	Nome	Descrição
	Evento básico	Representa as causas básicas ou raízes cujas combinações lógicas inseridas na árvore de falhas resultarão no evento de topo. O evento básico normalmente corresponde a um evento de falha de um componente ou a um erro humano, que geralmente possui dados básicos de falhas (taxa de falhas, tempo médio de reparo, etc).
	Evento intermediário	Ocorrem devido a uma ou mais causas antecedentes agem através das portas lógicas que compõem a árvore de falha.
	Evento condicionante	Representa eventos que ocorrendo juntamente com outro evento existente, produziram um resultado (evento intermediário). Pode ser utilizado juntamente com outras portas lógicas para representar uma condição especial ou evento gatilho (normalmente utilizado com a porta lógica “Inibição”).
	Evento não desenvolvido	Os motivos pela utilização deste são os de não se ter informações das causas básicas do evento ou não se haver dados relacionados a sua probabilidade de ocorrência.
	Evento externo	Representa um evento que tem sua ocorrência esperada. Assim, o símbolo mostra eventos que não são falhas.
 (a)  (b)	Evento de transferência	(a) <i>transfer out</i> : é utilizado na ramificação da árvore a ser copiada; (b) <i>transfer in</i> : indica o local da árvore que recebe a cópia feita pelo <i>transfer out</i> .

Fonte: IEC, 2006.

#### 2.2.1.4. Análise Qualitativa

A análise qualitativa da árvore de falhas tem como objetivo apresentar informações sobre a importância dos eventos básicos além de identificar as combinações de eventos básicos que contribuem para o evento de topo, simplificando as árvores de falhas de maneira com que estas sejam equivalentes as construídas inicialmente (BANDO; MARQUES; PATIAS, 2015).

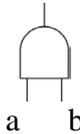
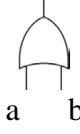
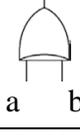
Há diversas técnicas que podem ser utilizadas na análise qualitativa de uma árvore de falha, transformando-a em equações por meio de álgebra booleana, sendo a técnica dos conjuntos de cortes mínimos (*Minimal Cut Sets, MCS*) uma das mais utilizadas (U.S. NRC, 1981).

Um conjunto de corte (*Cut Set, CS*) consiste em uma coleção de eventos básicos que quando ocorrem resultam na ocorrência do evento topo.

Segundo Bando, Marques e Patias (2015), um MCS corresponde as combinações mínimas de eventos que, quando ocorrem, garantem a ocorrência do evento topo, ou seja, um conjunto de cortes é considerado mínimo quando não puder ser reduzido sem perder a condição de conjunto de cortes.

A álgebra booleana é empregada na FTA visando determinar o MCS, simplificando em uma equação a combinação lógica das causas básicas que resultam o evento de topo. O Quadro 3 apresenta o equacionamento da álgebra booleana, normalmente utilizado na árvore de falhas.

Quadro 3 – Equacionamento da álgebra booleana aplicada na árvore de falhas.

Porta	Eventos	Equação Booleana	Tabela da Verdade		
E	Saída  a b	Saída = $A \cdot B$	A	B	Saída
			0	0	0
			0	1	0
			1	0	0
			1	1	1
OU	Saída  a b	Saída = $A + B$	A	B	Saída
			0	0	0
			0	1	1
			1	0	1
			1	1	1
OU Exclusivo	Saída  a b	Saída = $A \oplus B$	A	B	Saída
			0	0	0
			0	1	1
			1	0	1
			1	1	0
Não	Saída  A	Saída = $\bar{a}$	A	B	Saída
			0	0	0
			0	1	1
			1	0	1
			1	1	0

Fonte: Dias et al. (2013, p. 146).

O elemento zero “0” representa a ausência de causa e/ou evento e a unidade “1” representa a presença da causa e/ou evento.

A partir da aplicação das propriedades da álgebra booleana, apresentada no Quadro 4, é possível simplificar a equação do evento topo e desenvolver a análise quantitativa.

Quadro 4 – Propriedades da álgebra booleana.

Propriedade	Desenvolvimento	
Comutativa	$A + B = B + A$	$A \cdot B = B \cdot A$
Associativa	$(A + B) + C = A + (B + C)$	$(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$
Absorção	$A + (A \cdot B) = A$	$A \cdot (A + B) = A$
Idempotente	$A + A = A$	$A \cdot A = A$
Distributiva	$A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot (A + C)$	$A \cdot (B + C) = (A \cdot B) + (A \cdot C)$
Identidade	$A + 1 = 1$ ou $A + 0 = A$	$A \cdot 1 = A$ ou $A \cdot 0 = 0$
Complementar	$A + \bar{A} = 1$	$A \cdot \bar{A} = 0$
Teorema de Morgan	$\overline{(A + B)} = \bar{A} \cdot \bar{B}$	$\overline{(A \cdot B)} = \bar{A} + \bar{B}$

Fonte: Dias et al. (2013, p. 147)

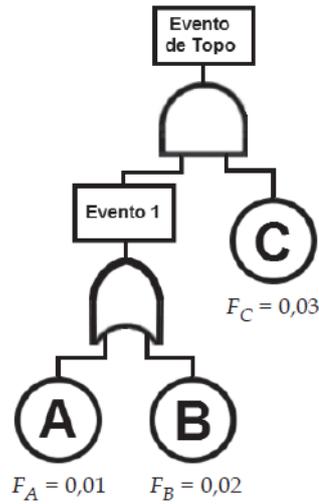
#### 2.2.1.5. Análise Quantitativa

A análise quantitativa de uma árvore de falha é comumente executada a partir dos resultados qualitativos obtidos por meio da álgebra booleana atrelados aos valores de probabilidade de ocorrência de cada evento, apresentados no Quadro 2. Os resultados podem expressar a influência que cada evento básico tem sobre a ocorrência do evento topo, além de apresentar uma estiva numérica da probabilidade de ocorrência do evento topo.

Dias et al. (2013) apresenta em sua obra um exemplo (Exemplo 1) de aplicação da análise quantitativa de uma árvore de falha:

**Exemplo 1:** Dada a árvore de falha da Figura 3 e considerando a independência das causas básicas (A, B e C) determinar a equação do evento de topo, sua probabilidade de ocorrência ( $F_{\text{Evento de Topo}}$ ) e a confiabilidade do sistema ( $R_{\text{Sistema}}$ ) (DIAS et al., 2013, p.148).

Figura 3 – Estrutura da FTA para o Exemplo 1.



Fonte: Dias et al. (2013, p. 148).

*Equação booleana dos eventos:*

Evento 1 = A + B;      Evento de Topo = (A + B) × C.

*De acordo com o Quadro 2, tem-se:*

Porta OU:  $F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_i(t)]$ ;

Porta E:  $F(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t)$ .

*Assim, tem-se:*

$$F_{\text{Evento 1}} = A + B = 1 - (1-0,01) \times (1-0,02) = 0,0298 = 2,98\%$$

$$F_{\text{Evento de Topo}} = F_{\text{Evento 1}} \times C = 0,0298 \times 0,03 = 0,000894 = 0,0894\%$$

$$R_{\text{Sistema}} = 1 - F_{\text{Evento de Topo}} = 1 - 0,000894 = 0,999106 = 99,91\%$$

### 3. METODOLOGIA

Visando viabilizar a realização deste trabalho, inicialmente foi feito um levantamento de possíveis empresas do setor ferroviário que pudessem contribuir com o histórico de falhas em suas locomotivas. Após contata-las, foi obtido retorno apenas de uma com o histórico completo de falhas de 2009 a 2016. Com isso, o trabalho foi viabilizado e iniciou-se o estudo das falhas ocorridas nas locomotivas desta empresa neste período. Sendo assim, o trabalho foi dividido em sete etapas, que serão representadas da seguinte forma:

1ª Etapa: Realização de uma revisão bibliográfica da técnica de análise de falhas utilizada;

2ª Etapa: Levantamento de falhas nas locomotivas, fazendo uso dos documentos fornecidos pela operadora ferroviária, verificando se o motor de tração é o conjunto crítico;

3ª Etapa: Apresentação de conceitos relacionados ao motor de tração de corrente contínua, seu funcionamento, componentes e características;

4ª Etapa: Análise de falhas nos motores de tração de corrente contínua, visando encontrar o item que mais falhou no período estudado;

5ª Etapa: Elaboração da FTA, de forma a representar a relação entre as partes que possam acarretar na ocorrência do evento topo;

6ª Etapa: Avaliação da FTA, realizando a análise qualitativa utilizando o método dos cortes mínimos, visando encontrar as causas que apresentaram maior influência na ocorrência do evento topo no período analisado;

7ª Etapa: Elaboração de propostas de soluções para as causas identificadas na etapa anterior.

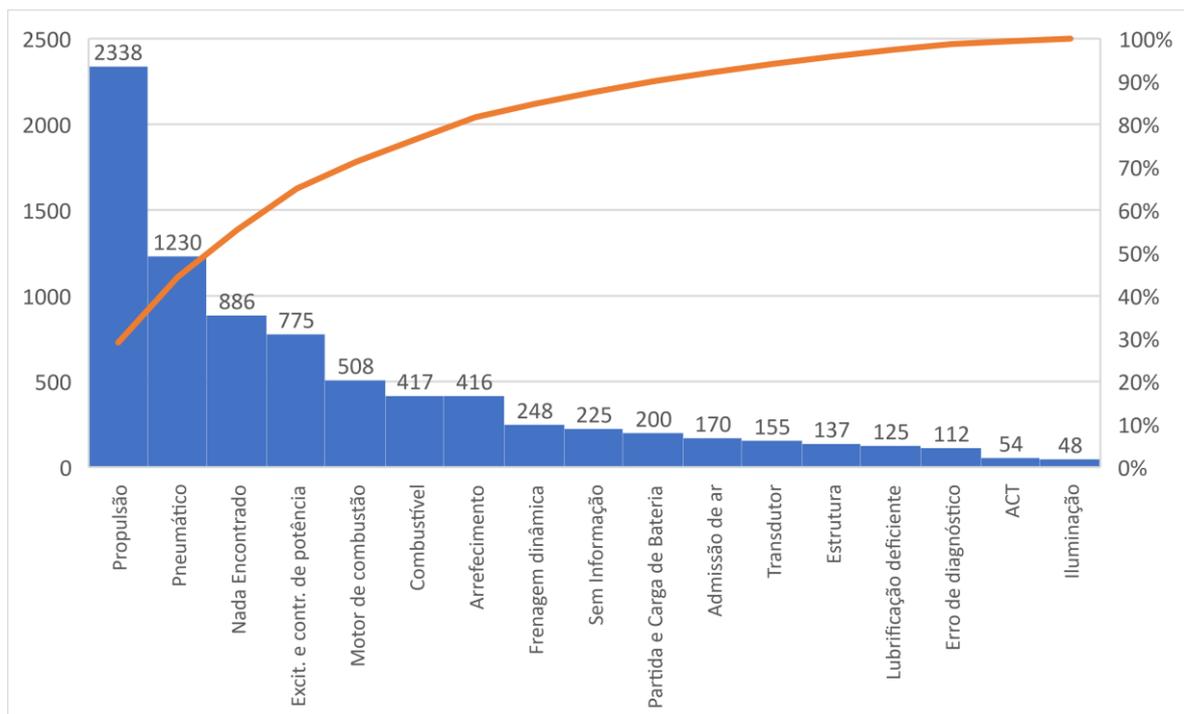
#### 4. ANÁLISE DAS FALHAS EM LOCOMOTIVAS

O estudo iniciou-se a partir dos dados enviados por uma operadora ferroviária contendo o histórico de falhas em locomotivas de 2009 a 2016. Este documento foi disponibilizado em formato de planilha de Excel e possui cerca de 10000 linhas e 47 colunas de dados relacionados as falhas ocorridas no período. O cabeçalho com os títulos de cada coluna está apresentado no Anexo A.

Analisando estes dados, foi possível notar que as locomotivas são divididas em sistemas, que são divididos em conjuntos e estes são divididos em itens.

Sendo assim, visando encontrar o item que apresenta o maior número de falhas para a elaboração da FTA, a análise iniciou a partir dos sistemas das locomotivas. Assim, foi elaborado um diagrama de Pareto para verificar qual sistema que apresentou o maior número de falhas neste período, como pode ser notado na Figura 4. Foram desconsideradas as falhas que não apresentavam o campo “Sistema” preenchido.

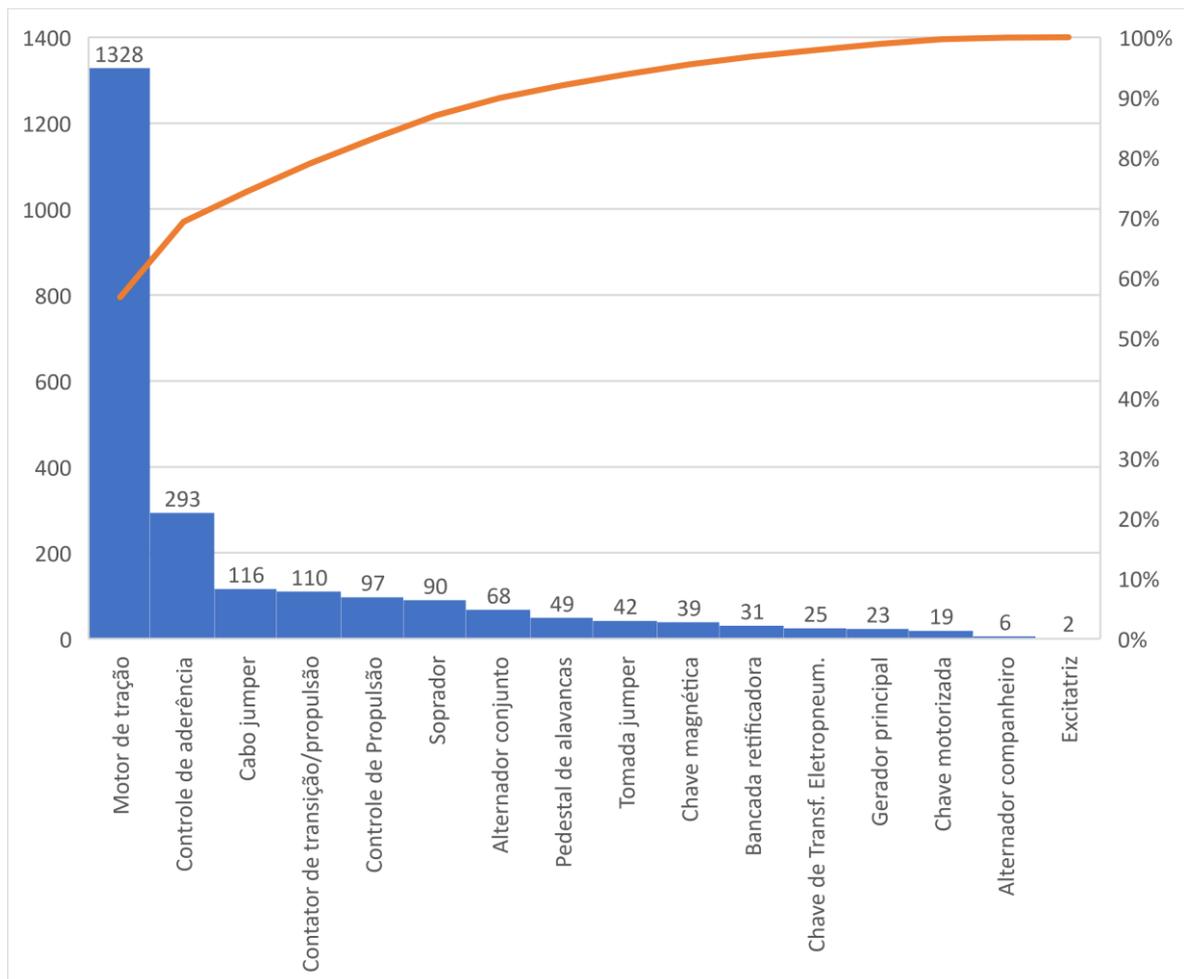
Figura 4 - Diagrama de Pareto das falhas dos sistemas das locomotivas.



Fonte: Dados obtidos junto à operadora ferroviária referente ao período de 2009-2016.

Deste modo, foi possível notar que o sistema mais crítico no que se refere ao número de falhas foi o de propulsão, representando 29,07% do total no período estudado. Seguindo a análise, o próximo passo é verificar qual conjunto deste sistema apresenta mais falhas. A Figura 5 apresenta o diagrama de Pareto dos conjuntos que pertencem ao sistema de propulsão.

Figura 5 - Diagrama de Pareto dos conjuntos do sistema de propulsão das locomotivas.



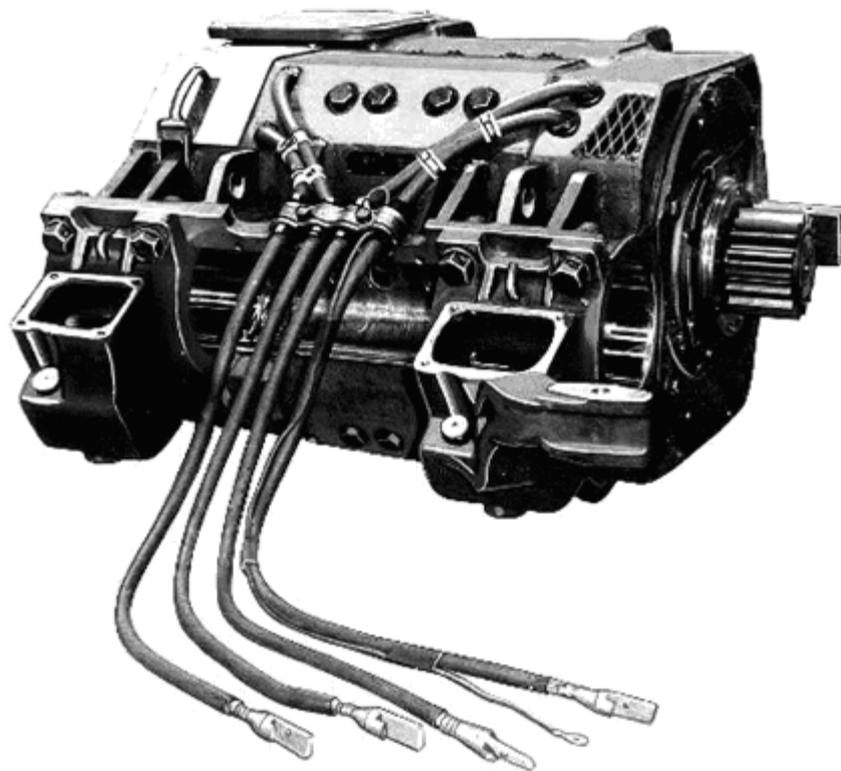
Fonte: Dados obtidos junto à operadora ferroviária referente ao período de 2009-2016.

Com isso, verificou-se que o conjunto que apresenta maior índice de falhas é o motor de tração, representando 56,8% do total de falhas do sistema de propulsão. Além disso, se comparado aos números do diagrama de Pareto dos sistemas das locomotivas (Figura 4), o motor de tração apresentará mais falhas que todo sistema pneumático (segundo sistema mais crítico neste período), justificando assim a escolha deste conjunto para o presente estudo. Outro ponto que torna os motores de tração elementos críticos para a empresa é sua manutenção ser demorada e de elevado custo.

#### 4.1. MOTOR DE TRACÇÃO

Nas locomotivas a diesel é indispensável a existência de um sistema de transmissão entre o motor diesel e as rodas, que transforme a potência mecânica fornecida pelo motor em esforço de tração e velocidade nas rodas. No caso das locomotivas diesel-elétricas, o sistema utilizado é o de transmissão elétrica, onde o esforço mecânico do motor diesel é transmitido às rodas por meio de motores elétricos de tração. Para que isso ocorra, o motor diesel é acoplado a um alternador que produz energia elétrica para alimentar os motores de tração. Na operadora ferroviária estudada, os motores de tração são de corrente contínua.

Figura 6 - Motor de tração de corrente contínua.



Fonte: Dalmaso (2010).

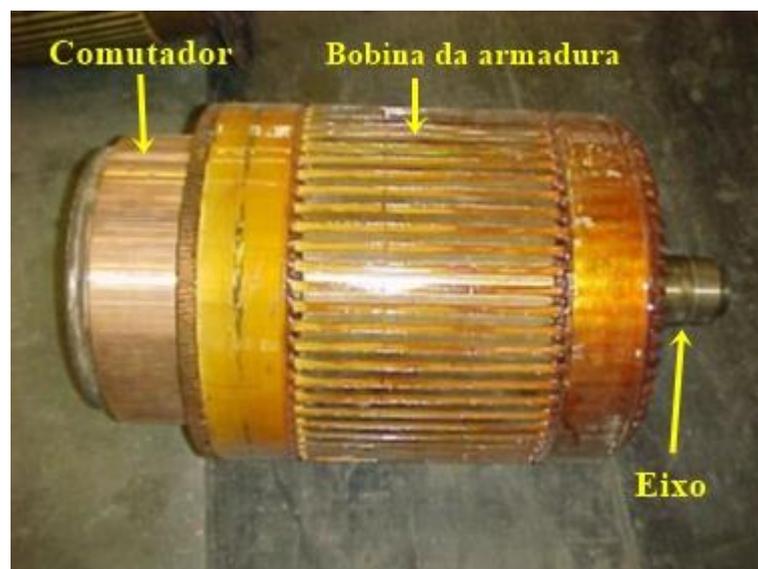
Segundo Borba (2011), motores utilizados em tração elétrica devem possuir as seguintes características:

- Elevado conjugado de partida, sem que a corrente alcance valores excessivos;
- Regulação motora variável;
- Permitir a frenagem elétrica, se possível com recuperação de energia;

- Rendimento elevado;
- Construção sólida.

De acordo Pacova e Vieira (1999), os motores de tração de corrente contínua são constituídos de uma armadura e um estator. O estator consiste de uma carcaça, que contém quatro bobinas de campo, quatro pólos de comutação ou interpolos, quatro porta escovas e dois rolamentos para apoio do eixo da armadura. Eletricamente, o campo de comutação é conectado em série com a armadura. Assim, o campo eletromagnético produzido pelo interpolo é diretamente proporcional à corrente da armadura, fornecendo desta maneira um alto torque de partida exigido pela locomotiva. A Figura 7 ilustra a armadura de um motor de tração.

Figura 7 - Armadura do motor de tração de corrente contínua.



Fonte: Pacova e Vieira (1999).

O funcionamento dos motores de tração parte do momento em que ao ser energizado, o motor partirá e tenderá ao equilíbrio a certa velocidade, dependendo da corrente e da carga. O aumento de corrente ou a redução da carga fará com que a velocidade do motor de tração aumente. Já com o aumento da carga ocorrerá o processo inverso. O fluxo de corrente através das bobinas de campo, produz uma polaridade definida em cada pólo, ou norte ou sul. Já o fluxo de corrente através da armadura e dos interpolos, produz a mesma polaridade na armadura que a do campo principal. Isto exerce uma força repulsora sobre a armadura, que faz com que ela gire (PACOVA; VIEIRA, 1999).

A energia mecânica produzida é disponibilizada pelo motor na ponta de seu eixo e a transmissão de movimento para as rodas é efetuada por meio de um par de engrenagens cilíndricas, denominadas de pinhão e engrenagem ilustradas na Figura 8.

Figura 8 - Pinhão e engrenagem.



Fonte: Dalmaso (2010).

O Quadro 5 apresenta os dados dos motores de tração de corrente contínua utilizados nas locomotivas da empresa estudada.

Quadro 5 - Características dos motores de tração.

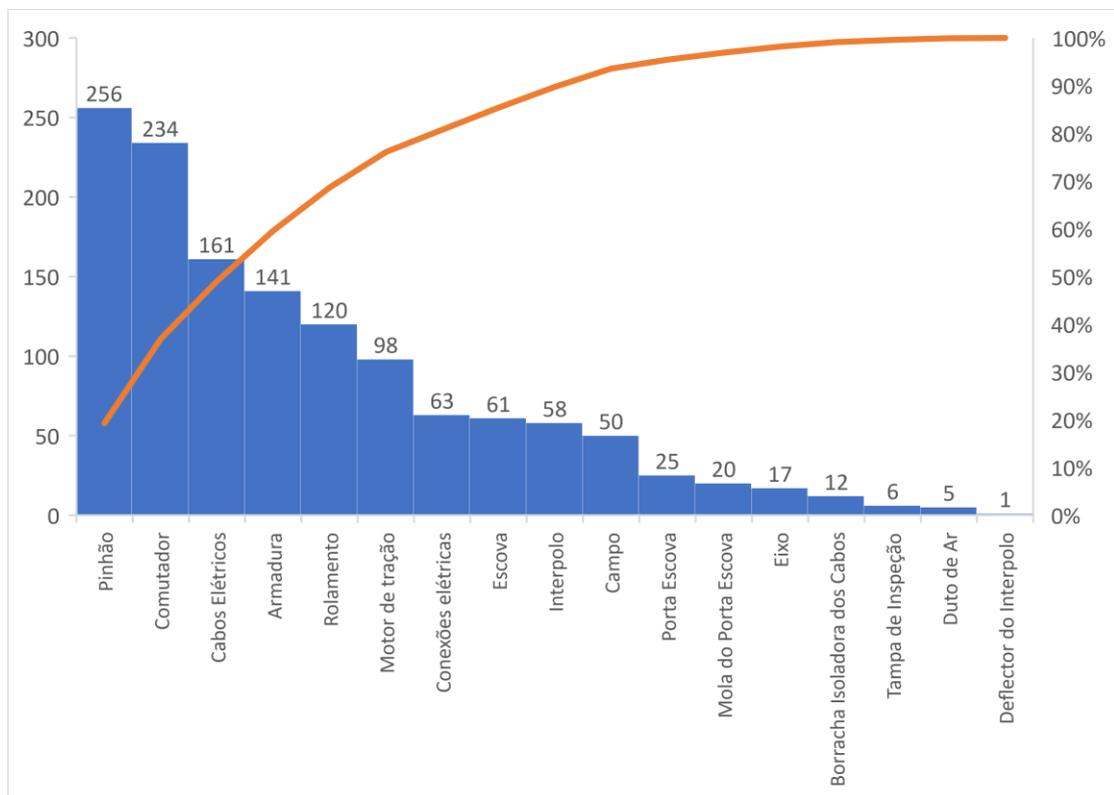
Dados	D31	761
Corrente Nominal	520 A	705 A
Tensão Nominal	615 V	500 V
Potência Nominal	319,8 kW	352,5 Kw
Corrente Máxima	735 A	997 A
Tensão Máxima	1200 V	1300 V
Potência Máxima	882 kW	1.296 kW
Rotação	2700 RPM	3100 RPM
Tipo	CORRENTE CONT. / EXCITAÇÃO SÉRIE	CORRENTE CONT. / EXCITAÇÃO SÉRIE
Resfriamento	AR FORÇADO	AR FORÇADO
Peso	2087	1560
Nº de Pólos	4	4
Classe de isolamento da Armadura	H	H
Classe de isolamento dos Pólos	H	H
Aplicação nas Frotas	DDM-45, DDM-MP,SD- 45, G12, G16	Dash-7, Dash-8,Dash- 9M, Dash-9W

Fonte: Dalmaso (2010)

## 4.2. ANÁLISE DE FALHAS NOS MOTORES DE TRAÇÃO

Após chegar no motor de tração com conjunto mais crítico no que se refere ao número de falhas nas locomotivas, foi elaborado o Diagrama de Pareto dos itens deste conjunto, para que assim, fosse possível detectar qual item apresentou maior número de falhas no período estudado. A Figura 9 apresenta o diagrama de Pareto dos itens dos motores de tração.

Figura 9 - Diagrama de Pareto dos Itens do motor de tração.



Fonte: Dados obtidos junto à operadora ferroviária referente ao período de 2009-2016.

Assim, é possível notar que o item que apresentou maior número de falhas no período é o pinhão, representando 19,28% do total.

Com isso, o pinhão será o item a ser estudado, aplicando-se o método de Análise de Árvore visando encontrar as causas raízes que o tornaram o item com mais falhas no período.

### 4.2.1. Pinhão

Nas locomotivas diesel elétricas, o pinhão é o item responsável por transmitir a energia mecânica gerada nos motores de tração para a engrenagem do rodeiro, e assim mover a

locomotiva. Essa transmissão de energia é feita a partir do contato dos dentes do pinhão com os dentes da engrenagem, fazendo assim com que o engrenamento correto entre eles seja de extrema importância, pois irá garantir um bom funcionamento do sistema, evitando que haja uma parada por quebra ou desgaste precoce dos componentes.

O pinhão possui forma cilíndrica e é fabricado em aço médio carbono tratado termicamente. Por ter furo cônico não chavetado, ele é montado a quente na ponta do eixo do motor de tração. Sendo assim, sua fixação ocorre unicamente pela interferência eixo-pinhão (BORBA, 2011). A Figura 10 ilustra o pinhão montado no motor de tração.

Figura 10 - Pinhão montado na ponta do motor de tração.

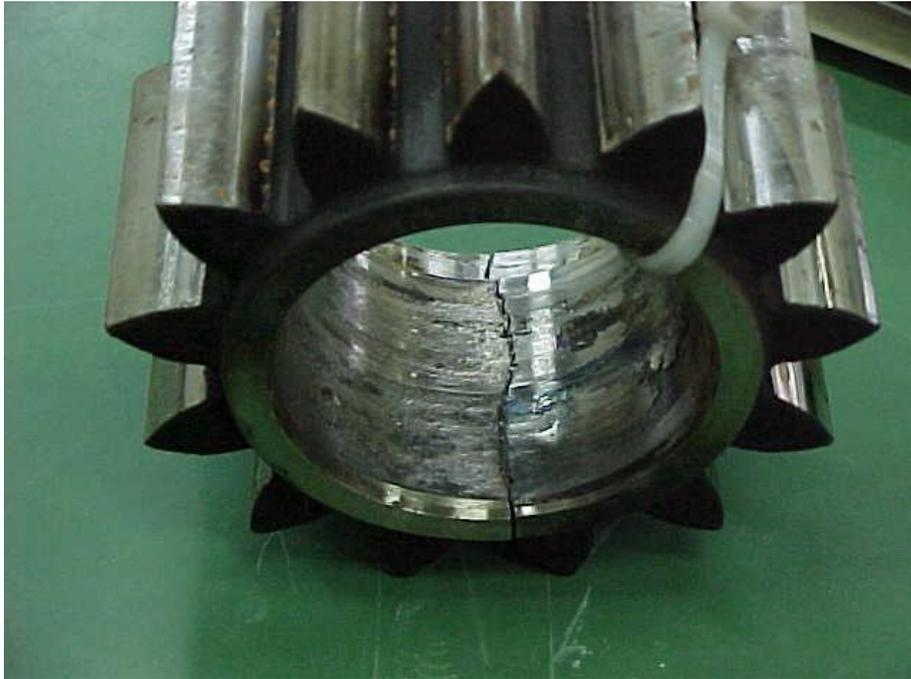


Fonte: Borba (2011)

Por receber cargas elevadas, tanto em momentos de tração como de frenagem, o acoplamento entre pinhão e eixo se torna um ponto crítico, sendo comum a ocorrência dos seguintes defeitos (BORBA, 2011):

- Quebra do dente do pinhão;
- Desgaste do dente do pinhão;
- Eixo do motor quebrado;
- Pinhão trincado (Figura 11).

Figura 11 - Pinhão trincado.



Fonte: Pacova e Vieira (1999).

Estas ocorrências geram a soltura do pinhão, fazendo com que o motor de tração deixe de rotacionar a engrenagem do rodeiro e, conseqüentemente, não tracione a locomotiva.

## 5. APLICAÇÃO DA FTA

Para elaboração da Árvore de Falha dos pinhões dos motores de tração, foi feita uma análise de seus modos de falhas visando determinar qual seria o evento topo. A Tabela 1 apresenta os modos falhas dos pinhões junto ao seu número de ocorrências registradas pela empresa no período estudado.

Tabela 1 - Modos de Falhas dos Pinhões.

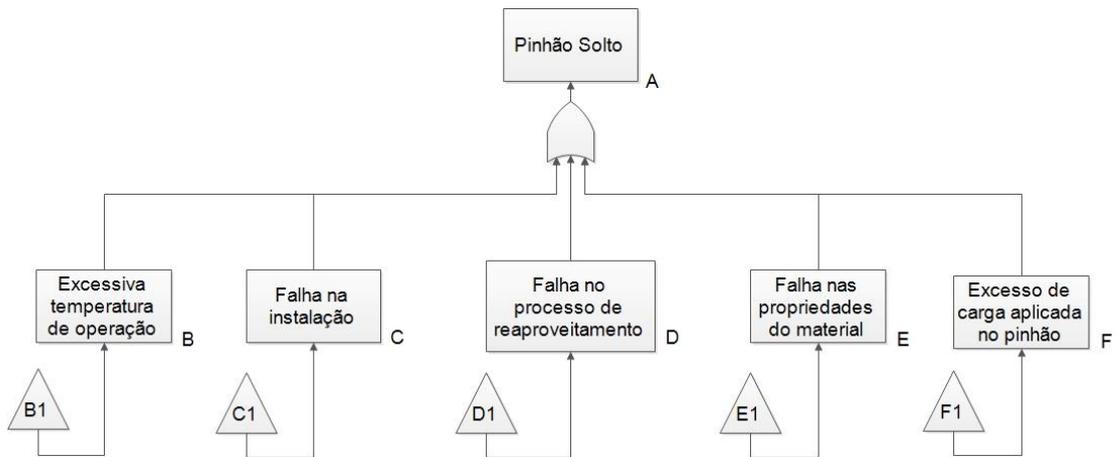
<b>Modo de Falha</b>	<b>Ocorrências</b>
Pinhão Solto	247
Fratura	4
Dente quebrado	2
Travamento	2
Deformação	1

Fonte: Dados obtidos junto à operadora ferroviária referente ao período de 2009-2016.

Baseando-se no número de ocorrências, foi escolhido “Pinhão Solto” como evento topo. Além disso, esse modo corresponde a 18,6% do total de falhas ocorridas nos motores de tração no período, representando assim alto impacto no conjunto como um todo. Este modo de falha ocorre quando o pinhão se solta do eixo do motor de tração, fazendo assim com que este motor gire sem tracionar a locomotiva.

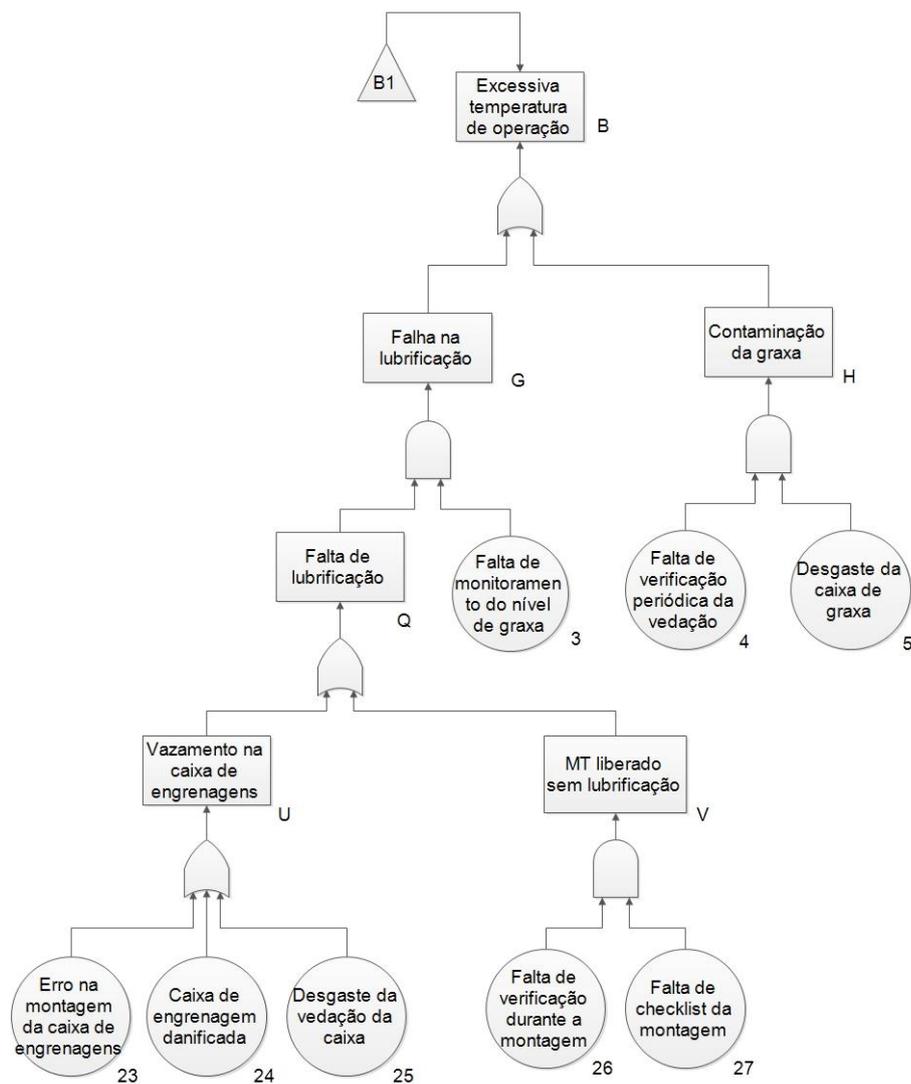
Após a definição do evento topo, foi feita uma análise em todas as falhas ocorridas nos pinhões visando identificar como ocorreram e assim conseguir estruturar a árvore. Uma pesquisa bibliográfica também foi feita para compreender melhor as possíveis causas que podem gerar a ocorrência deste evento. Desta forma, a FTA dos pinhões foi elaborada e, devido ao seu tamanho, está apresentada em seis figuras, sendo que a Figura 12 apresenta o evento topo e seus eventos intermediários de primeiro nível e as Figuras 13, 14, 15, 16 e 17 apresentam as causas básicas que geraram estes eventos intermediários.

Figura 12 - Evento topo e seus eventos intermediários de primeiro nível.



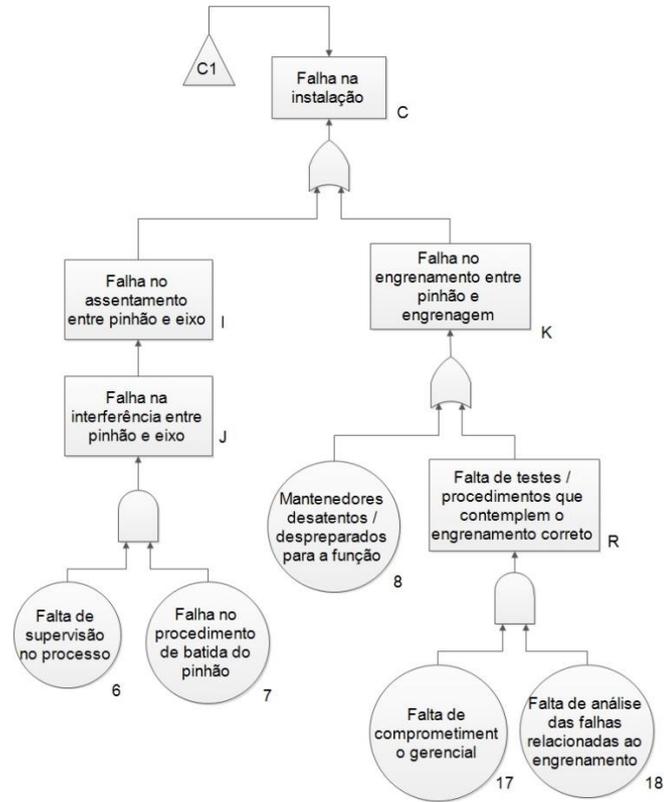
Fonte: Autor (2018)

Figura 13 - Causas do evento “Excessiva temperatura de operação”.



Fonte: Autor (2018)

Figura 14 - Causas do evento “Falha na instalação”.



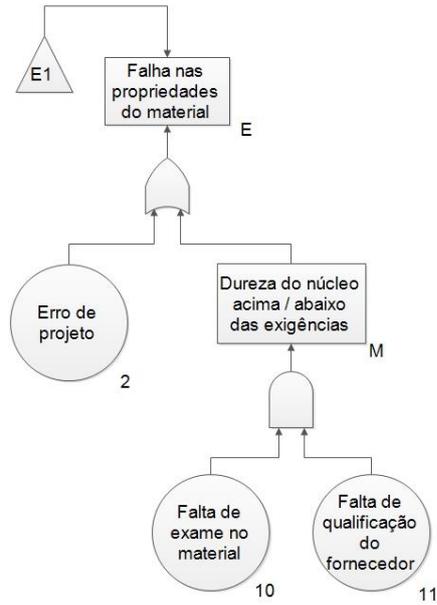
Fonte: Autor (2018)

Figura 15 - Causas do evento “Falhas no processo de reaproveitamento”.



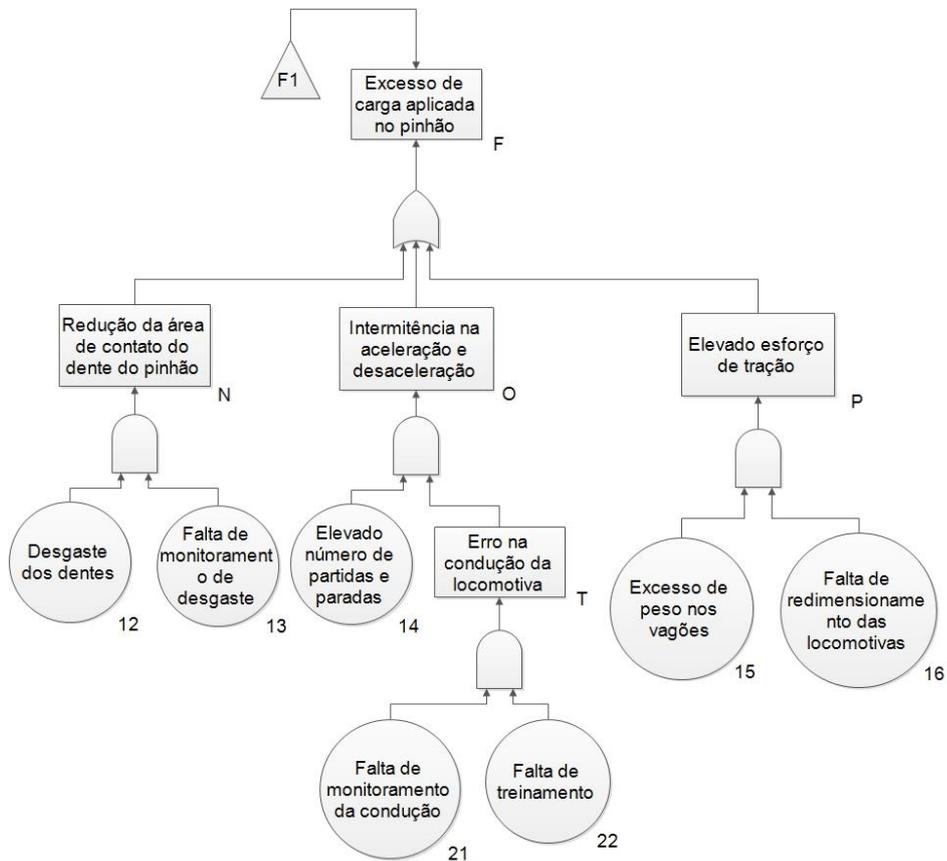
Fonte: Autor (2018).

Figura 16 - Causas do evento "Falha nas propriedades do material".



Fonte: Autor (2018).

Figura 17 - Causas do evento “Excesso de carga aplicada no pinhão”.



Fonte: Autor (2018)

Com a Árvore de Falhas elaborada, iniciou-se a análise qualitativa a partir da aplicação do conjunto cortes mínimos.

### 5.1. CONJUNTO CORTES MÍNIMOS

Para realização da análise qualitativa da FTA foi utilizado o Algoritmo de determinação dos Conjuntos de Cortes Mínimo, desenvolvido por Jerry Fussel e Willian Vesely. Esse algoritmo também já foi utilizado para analisar a perda ou ausência de esforço trator dos motores de tração das locomotivas, falha de link do locotrol e a confiabilidade dos sistemas ativos de injeção de segurança de Angra 1 nos trabalhos de Vieira (2012), Portugal (2006) e Melo (1981) respectivamente.

A regra para desenvolvimento deste algoritmo é simplesmente baseada na substituição de cada porta por suas entradas em uma matriz, sendo que a porta “OU” representa Entradas na Coluna e a porta “E” representa Entradas na Linha.

Com isso, após a substituição de todas as portas lógicas por suas entradas, o resultado será uma matriz onde cada linha corresponde a um corte. O número de linhas desta matriz representa a quantidade de cortes, enquanto as colunas indicam a ordem do corte (PORTUGAL, 2006). Assim, uma porta “OU” sempre aumenta o número de cortes e uma porta “E” sempre aumenta a ordem do corte.

Os conjuntos de cortes gerados por este método serão os conjuntos de cortes mínimos, onde quanto menor a ordem do corte mínimo, maior é a criticidade para o sistema.

Visando exemplificar a aplicação deste algoritmo vamos analisar a Árvore de Falhas apresentada na Figura 18.

Iniciamos a análise a partir da porta “OU” G1 que tem como eventos de entrada os eventos B e C. Assim temos o início da montagem da matriz:

B;

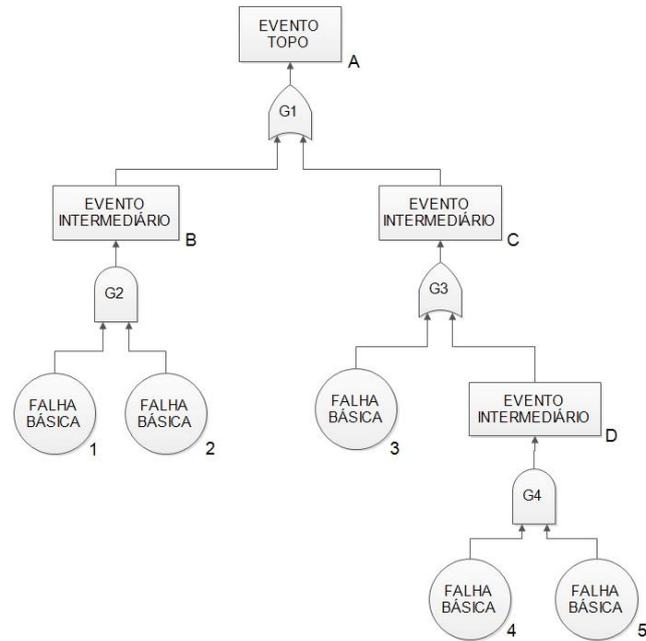
C.

Prosseguindo, vamos substituir o evento B pelos eventos de entrada da porta G2 que é do tipo “E”. Assim temos:

1, 2;

C.

Figura 18- Exemplo de Árvore de Falhas.



Fonte: Autor (2018).

O evento C está conectado a porta G3 que é do tipo “OU”, portanto, substituindo-o pelas suas entradas temos:

1, 2;  
3;  
D.

Por último, substituímos o evento D pelos eventos de entrada da porta G4, que é o tipo “E”. Assim, temos a matriz final dos cortes mínimos apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Matriz final do exemplo da aplicação conjunto de cortes mínimos.

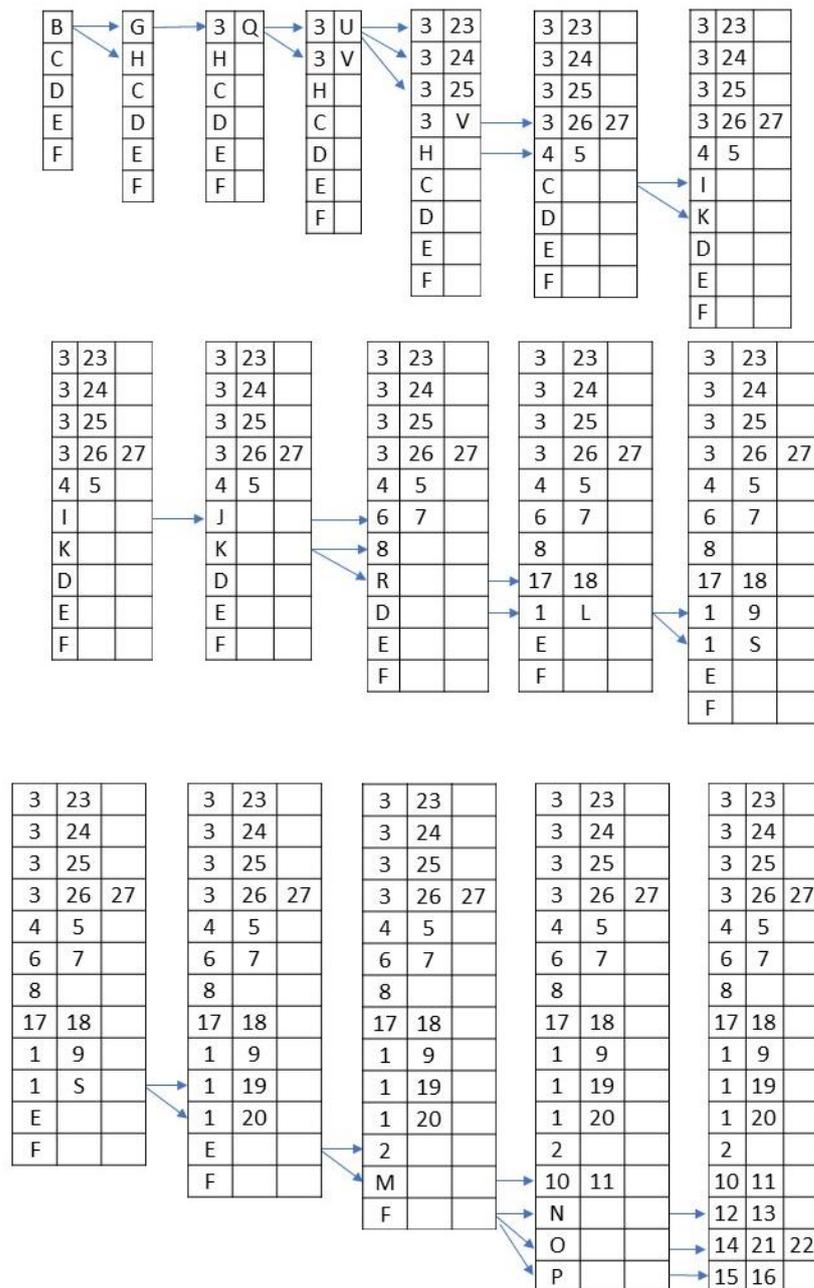
1	2
3	
4	5

Fonte: Autor (2018).

Com isso, podemos observar que temos três cortes, sendo um de primeira ordem e dois de segunda ordem.

Para aplicação deste algoritmo na Árvore de Falhas dos pinhões, os eventos intermediários foram nomeados com letras e os eventos básicos com números. A Figura 20 ilustra o passo a passo do diagrama de cortes mínimos criado a partir da FTA.

Figura 20 - Diagrama de corte mínimos da FTA dos pinhões.



Fonte: Autor (2018)

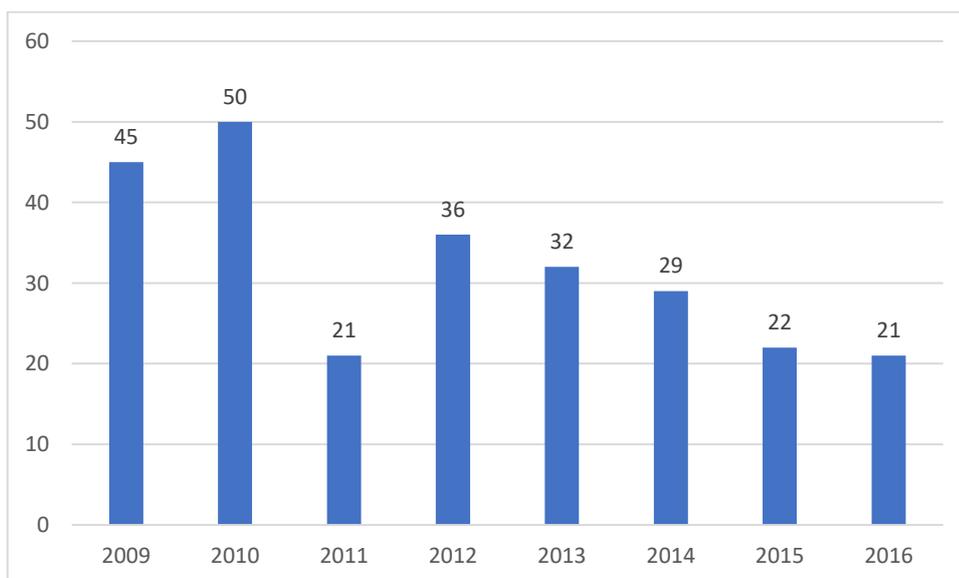
Desta forma, foram encontrados dezesseis cortes, sendo dois cortes de primeira ordem, doze de segunda ordem e dois de terceira ordem. Assim, para tentar minimizar a ocorrência do

evento topo deve-se tentar eliminar prioritariamente as causas mais críticas, ou seja, as representadas nos cortes de primeira ordem. Com isso, após a análise qualitativa, pode-se observar na FTA que as causas dois e oito, “Erro de Projeto” e “Mantenedores desatentos/despreparados para a função” respectivamente, vão ocorrer independente dos outros elementos da árvore, fazendo com que estas se tornem objeto de estudo para se buscar possíveis soluções.

## 5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O estudo teve início na falha “Erro de Projeto”, onde foi verificado que a empresa diagnosticou falhas na especificação do pinhão em 2008 e um novo projeto foi elaborado, com alteração nos parâmetros dimensionais e metalúrgicos. Porém, como a empresa possui mais de três mil motores e que cada motor tem um pinhão, era inviável a substituição de todos de uma vez. Assim, foi decidido que os pinhões antigos seriam trocados pelo de nova especificação quando os mesmos falhassem. Por este motivo, ainda houve um significativo número de falhas residuais de pinhões de projeto antigo (47 falhas) que estavam em operação durante o período avaliado. De acordo com o histórico de falhas essa falha ocorreu entre os anos de 2009 e 2012. O impacto da redução deste tipo de ocorrência pode ser notado na Figura 21, que apresenta o número de falhas nos pinhões durante o período analisado.

Figura 21 - Número de falhas dos pinhões dos motores de tração de 2009 a 2016.



Fonte: Dados obtidos junto à operadora ferroviária referente ao período de 2009-2016.

A outra causa raiz encontrada, “Mantenedores desatentos/despreparados para a função”, representa um problema mais crítico. A partir da Tabela 2, pode-se notar que os erros relacionados a mão de obra, tanto na manutenção como na recuperação, representam 18,75%, o deixando no topo da lista, se desconsiderarmos as causas sem informação.

Tabela 2 - Causas de falhas nos pinhões de 2009 a 2016.

<b>Causas</b>	<b>Nº de ocorrências</b>	<b>%</b>
Sem informação para determinar	105	41,02%
Projeto antigo	47	18,36%
Erro de mão de obra – Manutenção	27	10,55%
Erro de mão de obra – Recuperação e análise do componente	21	8,20%
Causa não definida	15	5,86%
Falha no material	21	8,20%
Fim da vida útil	13	5,08%
Procedimento Inadequado	4	1,56%
Falha de Material em Garantia	3	1,17%

Fonte: Dados obtidos junto à operadora ferroviária referente ao período de 2009-2016.

Estes números relacionados a mão de obra podem aumentar se considerarmos que 46,88% das falhas tem causas não determinadas ou não possuem informações suficientes. Assim, essas causas deveriam estar distribuídas pelas causas da tabela, atenuando ainda mais as falhas relacionadas a mão de obra. Este alto número de causas não definidas ou sem informações também expõe um problema com a falta de informações sobre as falhas, o que dificulta tanto na análise das falhas como na busca de possíveis soluções para saná-las.

Diferente da causa raiz relacionada ao erro de projeto, este não se trata de um problema já norteado. Considerando os dois últimos anos do histórico enviado, 2015 e 2016, das 43 falhas ocorridas nos pinhões, 24 estão relacionadas a erro de mão de obra, correspondendo 55,81% das ocorrências.

Além disso, se analisarmos as falhas nos motores de tração no período estudado, cerca de 25,8% estão relacionadas a erro de mão de obra e 38,9% não tem informações sobre suas causas, mostrando que estes problemas também têm grande representatividade no conjunto como um todo.

Porém, esses problemas não podem ser relacionados apenas aos mantenedores. Os supervisores e gerentes de manutenção devem dar suporte na aplicação de treinamentos, análise das falhas e de materiais, criação de procedimentos e fiscalização das tarefas executadas visando condicionar e orientar sua equipe.

## 6. CONCLUSÃO

Após a aplicação da Análise de Árvore de Falhas e com o auxílio do conjunto de cortes mínimos, foi possível constatar que as falhas relacionadas a erros de mão de obra e erro no projeto foram as principais causas responsáveis por tornar o pinhão o item mais crítico no que se refere ao número de falhas no período de 2009 a 2016. Essa influência foi comprovada a partir dos números de ocorrência com estas causas no período.

As falhas referentes a erro de projeto já foram norteadas e resolvidas pela empresa, mas problemas relacionados a falhas na manutenção ou erros na mão de obra são difíceis de serem resolvidos. Porém, a aplicação de algumas medidas pode trazer um resultado significativo na redução deles, sendo elas:

- Aplicação de treinamentos periódicos para as equipes de manutenção e recuperação dos pinhões, visando tanto preparar os novos funcionários, como reciclar os funcionários mais antigos;
- Revisão ou criação de um novo procedimento que contemple uma montagem correta do engrenamento, visto que este é um dos principais motivos das falhas;
- Maior supervisão sobre os itens recuperados, evitando a liberação de itens em final de vida útil ou com dureza ou desvios fora das especificações;
- Avaliar a rotatividade da mão de obra e os planos de carreira das equipes de manutenção;
- Melhoria no processo de análise das causas, criando uma regra que faça com que as análises das falhas sejam feitas até a detecção das causas, visto que 46,8% das falhas ocorridas no período estudado tem causas não definidas ou sem informação. Este problema também se replica para os outros itens do motor de tração. A equipe de análise de falhas tem um papel muito importante na manutenção, pois a partir dela é possível direcionar os treinamentos para os itens em que a mão de obra tem mais falhado e detectar possíveis novos modos de falhas.

Algumas destas medidas podem ser aplicadas em todo o processo de manutenção dos motores de tração, dado que os mesmos problemas críticos (erro de mão de obra e causas sem informação suficiente) são replicados para o conjunto como um todo.

Cabe ressaltar que um constante investimento em melhoria no processo de manutenção como análises de vida útil dos itens, manutenção preventiva rigorosamente empregada e aplicação de manutenção centrada em confiabilidade em itens e conjuntos críticos podem trazer vantagens não só na diminuição de ocorrências, mas também no aumento da produtividade de carga transportada e conseqüentemente no lucro final da empresa.

Assim, pode-se concluir que apesar dos pinhões serem itens robustos, sua instalação e recuperação necessitam de grandes cuidados e atenção na execução, visto que eles trabalham em condições severas.

Mesmo com a diminuição das falhas nos pinhões durante o período estudado, se considerarmos apenas os três últimos anos do histórico, o pinhão continuará sendo o item que mais falha nos motores de tração. Porém, neste período houve um crescimento significativo das falhas nos rolamentos dos motores de tração, os tornando o segundo item que mais falha, sendo a análise destas falhas uma sugestão para futuros trabalhos.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L. O. C.; GRILO, L. M.; SOUZA, U. E. L. & MELHADO, S. O. **Microplanejamento do Serviço de Concretagem: Análise e Aplicabilidade das Ferramentas da Qualidade.** II SIBRAGEC, 2000.
- ARAÚJO, L. O. C.; AQUINO, J. P. R.; ROTONDARO, R. G. **Análise e Aplicabilidade das Ferramentas da Qualidade no Serviço de Formas como Auxílio ao Planejamento para Produção.** Enegep, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: **Confiabilidade e Mantenabilidade.** Rio de Janeiro, 1994. 37 p.
- BACELO, J. R.; PARREIRA, W. D. **Análise do Risco e da Confiabilidade em Sistemas Complexos.** XXXIV SIMPOSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, p. 935-939, 2016.
- BANDO, F. M.; MARQUES, J. M.; PATIAS, J. **Análise Probabilística de árvore de Falhas na Gestão de Segurança de Barragens – Bloco D38 da Barragem de ITAIPU.** Comitê Brasileiro de Barragens, Foz do Iguaçu, p.1-14, 2015.
- BORBA, José Luiz. **Mecânica de Locomotivas.** Pós-graduação em Engenharia Ferroviária. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, IEC -Instituto de Educação Continuada, 2011.
- BORBA PRÁ, E. **A Manutenção Industrial Sob a Perspectiva da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) em uma Empresa da Área de Compressores Herméticos.** 2010. 72 p. Dissertação (Graduação em Engenharia em Produção e Sistemas) – Universidade do Estado de Santa Catarina, 2010.
- CLIFTON, A. E. **Fault Tree Analysis – A History.** The Proceedings of The 17th International System Safety Conference, Washington, p. 1-9, 1999.
- DALMASO, Alanderson Amorim. **Análise de dados de vida em motores de tração de corrente contínua das locomotivas na EFVM.** 2010. 70 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Fundação Novo Milênio, Vila Velha, 2010.
- DHILLON, B. S. **Methods For Performaing Human Realiability and Error Analysis in Health Care.** International Jornal of Heath Carl Quality Assurance, p.306-18, 2003.
- DIAS, Acires et al. **Metodologia para Análise de Risco:** Mitigação de perda de SF6 em disjuntores. Florianópolis: S.n., 2013. 303 p.

EBELING, Charles. **An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering**. New York: The McGraw – Hill Companies, Inc., 1997.

ERICSON, Clifton A.; LL, Clifton. **Fault tree analysis**. In: System Safety Conference, Orlando, Florida. 1999. p. 1-9.

FAGUNDES, L. D. **Mapeamento de Falhas em Concessionária do Setor Elétrico: Gestão do Conhecimento Auxiliando a Gestão da Manutenção**. 2005. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, 2005.

HONG, W. **Aplicação do Método de Análise de Risco ao Estudo do Descarrilamento**. 2011. 194p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) – Universidade de São Paulo, 2011.

**IEC 61025**: Fault Tree Analysis. 2 ed. Genebra, 2006.

MELO, P. F. F. F. **Análise da Confiabilidade dos Sistemas Ativos de Injeção de Segurança de Angra 1**. 1981. 192p. Tese (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1981.

MENDES, J. J.; MARIA, R. C.; RADIN, L. P.; AS, D. A. P.; CORDEIRO, R. O. **Engenharia de Confiabilidade – Um Estudo de Caso para Avaliação do Desempenho do Sistema de Descarga de Minério “Virador de Vagões” Durante o Primeiro Ano de Operação**. Enegep, p.1-17, 2014.

RAUSAND, M.; HOYLAND, A., **System reliability theory: models, statistical methods, and applications**. John Wiley & Sons, New York, 2004.

PACOVA, A. C.; VIEIRA, A. R. **Estudo sobre falhas nos motores de tração das locomotivas da EFVM**. 1999. 70 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1999.

PORTUGAL, B. F. **Utilização de Árvore de Falhas como Subsídio para Manutenção Centrada em Confiabilidade de Locomotivas**. 2006. 65p. Monografia (Especialização em Transporte Ferroviário de Cargas) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

SAKURADA, E. Y. **As técnicas de análise dos modos de falhas e seus efeitos e análise de árvore de falhas no desenvolvimento e na avaliação do produto**. 2001. 145 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SCHMITT, J. C. **Método de Análise de Falha Utilizando a Integração das Ferramentas RCA, FTA e FMEA**. 2013. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara D’oeste, 2013.

U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Fault Tree Handbook**. Springfield, VA, 1981. 209 p.

VIEIRA, D. B. **Análise de Causas de Falhas em Locomotivas com Subsídio da Árvore de Falhas**. 2012. 49p. Monografia (Especialização em Transporte Ferroviário de Cargas) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

## **ANEXO A – CABEÇALHO DA PLANILHA DE DADOS DA OPERADORA FERROVIÁRIA**

Segue abaixo a lista com os títulos (com suas respectivas explicações) do cabeçalho da planilha enviada pela operadora ferroviária contendo o histórico de falhas de suas locomotivas.

- **Ferrovia** - Nome da ferrovia que a locomotiva pertence;
- **Frota** - Modelo da locomotiva;
- **Ativo** - Código da locomotiva;
- **Motivo do Serviço** – Motivo que levou a realização da manutenção;
- **Relatado em** – Data e horário que o defeito foi relatado;
- **Sintoma** – Sintoma apresentado pela locomotiva na avaria;
- **Codi\_Sistema** – Código do sistema da locomotiva;
- **Codi\_Conjunto** – Código do conjunto da locomotiva;
- **Codi\_Item** – Código do item da locomotiva;
- **Codi\_Problema** – Código do problema ocorrido;
- **Codi\_Solução** – Código da solução adotada;
- **Ordem de Serviço** – Número da ordem de serviço executada;
- **Descrição da OS** – Descrição inicial da ordem de serviço executada;
- **Descrição Detalhada OS** – Descrição detalhada da ordem de serviço executada;
- **Histórico de Manutenção** – Histórico de manutenções recentes efetuadas na locomotiva;
- **Trem** – Código do trem;
- **Tipo de Trem** – Tipo de montagem do trem (Ex: locotrol, convencional, etc);
- **Comando** – Tipo de comando utilizado no trem;
- **Posicionamento** – Posicionamento da locomotiva (Ex: frente, recuo);
- **Peso** – Peso total dos vagões em toneladas;
- **Corrente Elétrica** – Valor de corrente em Amperes aplicada nos motores de tração;
- **Velocidade** – Velocidade do trem no momento da falha;

- **Ponto** – Ponto de aceleração da locomotiva no momento da falha;
- **Distribuição** – Distribuição das locomotivas (indicada pelo código de cada locomotiva) no trem;
- **Inclinação** – Inclinação do terreno onde a locomotiva se encontrava no momento da falha;
- **Chovendo** – Condição do tempo no momento da falha (chovendo ou não);
- **Status** – Status do reparo;
- **Causa** – Causa da falha;
- **Resumo** – Descrição e conclusão das análises de falhas feita;
- **Data de Conclusão** – data de conclusão da manutenção;
- **Descrição Detalhada** – Descrição do plano de ação;
- **Objetivo do Plano** – Objetivo do plano de ação;
- **Observações** – Observações sobre a falha ocorrida;
- **Observações Detalhadas** – Observações detalhadas sobre a falha ocorrida e as ações tomadas;
- **Ano** – Ano em que a falha ocorreu;
- **Mês** – Mês em que a falha ocorreu.

Além destas colunas, há também outras colunas na planilha preenchidas com códigos, que não foram repassados pela operadora nem utilizados no desenvolvimento do trabalho. Com isso, não foi possível identificar o real significado dos títulos destas colunas. São elas: Dever, Ocorrência, Tempo Direto, Qtde Indireta, Tempo Indireto, Chegou na Oficina, RH, Plano Ativo, Plano, Item, Tarefa.