

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

BERNARDO BICALHO CARVALHAES

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA MEDIR E  
AVALIAR A ECO-EFICIÊNCIA DA OPERAÇÃO DE  
LOCOMOTIVAS**

VITÓRIA  
2016

BERNARDO BICALHO CARVALHAES

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA MEDIR E  
AVALIAR A ECO-EFICIÊNCIA DA OPERAÇÃO DE  
LOCOMOTIVAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Transportes.

Orientador: Prof. Rodrigo de Alvarenga Rosa, D.Sc.

Coorientador: Prof. Marcio de Almeida D'Agosto, D.Sc.

VITÓRIA

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Tecnológica,  
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

C331d      Carvalhaes, Bernardo Bicalho, 1980-  
Desenvolvimento de um método para medir e avaliar a eco-  
eficiência da operação de locomotivas / Bernardo Bicalho  
Carvalhaes. – 2016.  
89 f. : il.

Orientador: Rodrigo de Alvarenga Rosa.  
Coorientador: Marcio de Almeida D'Agosto.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade  
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Transporte ferroviário. 2. Gás natural liquefeito. 3.  
Biodiesel. 4. Locomotivas. I. Rosa, Rodrigo de Alvarenga. II.  
D'Agosto, Marcio de Almeida. III. Universidade Federal do  
Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

---

BERNARDO BICALHO CARVALHAES

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA MEDIR E  
AVALIAR A ECO-EFICIÊNCIA DA OPERAÇÃO DE  
LOCOMOTIVAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Transportes.

Aprovada em 02 de Junho de 2016

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

Prof. Dr. Marcio de Almeida D'Agosto  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Coorientador

---

Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

Prof. Dra. Gisele de Lorena Diniz Chaves  
Universidade Federal do Espírito Santo

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha esposa Jacqueline pelo incentivo, apoio, carinho e companheirismo tão importantes. A meus filhos Rafael e Maitê, que deram novo significado à minha vida. A meus pais Merrê e Marcos e irmãos Daniela e Bruno que, apesar da distância, se fazem presentes em todos os momentos da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa e filhos, pelo apoio, união e compreensão em todos os momentos que precisei me retirar para dedicar a este e outros trabalhos. Não fosse por isso, não teria concretizado mais esta etapa.

A meus pais e irmãos, que apesar da distância, exercem grande influência em minhas decisões se fazendo presentes em todos os momentos, e que me fizeram o que sou hoje.

Ao meu orientador, Professor Rodrigo de Alvarenga Rosa, por acreditar em minha capacidade, compartilhar seus conhecimentos e se dedicar de forma única no desenvolvimento deste trabalho. Obrigado por ser parceiro dentro e fora da pesquisa, sempre disposto a ajudar um colega. A você, minha admiração e respeito!

Ao Professor João Luiz Calmon, pela compreensão durante momentos decisivos do desenvolvimento deste trabalho, pelas conversas sobre filosofia e afins, pelos ensinamentos em sala de aula e, enfim, por aceitar participar da banca examinadora da dissertação e dar importantes contribuições.

À Professora Gisele Chaves, pela disponibilidade e participação na banca examinadora dessa dissertação e contribuição com importantes sugestões e observações.

A todos os colegas da VALE, pela riquíssima troca de experiências que, durante vários anos, contribuíram de forma decisiva na minha formação profissional e pessoal. Foram ótimos momentos de convívio dentro e fora da empresa, uma experiência maravilhosa que levarei com muito gosto pelo resto de minha vida.

À VALE por disponibilizar dados e informações que viabilizaram a realização do trabalho.

*“Se você não pode explicar algo de forma simples, é porque não a entende bem.”*

*Albert Einstein*

## RESUMO

As ferrovias brasileiras transportaram mais de 460 milhões de toneladas em 2014 e estão buscando alcançar os padrões ambientais internacionais. Os impactos ambientais decorrentes da utilização de óleo diesel e de combustíveis alternativos utilizados nas locomotivas foram analisados neste estudo. Este artigo propõe um método baseado nas métricas do *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) para avaliação da eco-eficiência da operação de locomotivas de ferrovias nacionais ou internacionais, de passageiros e de carga. Sete indicadores foram criados de forma a tornar viável a comparação entre os cenários, sendo eles: consumo de energia total (E), consumo total de energia renovável (RE), emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), emissões de monóxido de carbono (CO), emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), emissões de material particulado (MP) e eficiência de custos (investimento, manutenção e combustíveis) (EC). O método foi aplicado na Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), uma das ferrovias mais importantes do Brasil. Cinco cenários que representam a troca de fontes de combustível foram desenvolvidos, testados e analisados, sendo o Cenário 1 o atual modo de operação da ferrovia. Os cenários levam em consideração a utilização de biodiesel na concentração de 5% no óleo diesel convencional (B5) e também na concentração de 25% (B25). Além disso, foi estudada a utilização de gás natural liquefeito (GNL) associado ao B5 e B25. Após análise dos dados, os resultados demonstraram que se o Cenário 4 for implementado, em comparação ao Cenário 1 a ferrovia pode ganhar 2,3% no indicador de eficiência energética, 139% no indicador de energia renovável, 32% em emissão de CO<sub>2</sub>, 100% em MP, 60,0% em NO<sub>x</sub> e 12,6% em Eficiência de Custo. O único indicador que apresenta pior resultado se comparados o Cenário 4 e Cenário 1 é a emissão de CO, com piora no indicador de -3,2%, em função do uso de GNL. Os resultados demonstram que o método proposto pode ser utilizado como uma ferramenta de suporte para auxiliar a ferrovia a decidir qual a melhor mistura de combustíveis e a melhor tecnologia a ser utilizada, para que se possa minimizar o impacto ambiental e os custos operacionais da mesma. Os resultados foram comparados aos padrões da *United States Environmental Protection Agency* (EPA), agência americana responsável pela regulação dos padrões de emissão no país, sendo capazes de alcançar, em alguns casos, os mais altos padrões de exigência.

Palavras-chave: Eco-eficiência. Transporte Ferroviário. Gás natural liquefeito. Biodiesel. Locomotivas.



## ABSTRACT

Brazilian railroads transported over 460 million tons in 2014 and are reaching to achieve international environmental standards. Thus, it is important to analyze the environmental impact of the use of diesel and alternative fuels. This paper proposes a method based upon the World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) metrics to evaluate the railroad's locomotive operation eco-efficiency. Seven Eco-Efficiency Measurement (EM) indicators were created so that the scenarios could be properly compared. They are respectively: Total energy consumption (E), Total renewable energy consumption (RE), Carbon dioxide emissions (CO<sub>2</sub>), Carbon monoxide emissions (CO), Nitrogen oxides emissions (NO<sub>x</sub>), Particulate matter emissions (PM) and Cost Efficiency (investment, maintenance and fuel) (CE). The method was applied to Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), one of the most important railroads in Brazil. Five different scenarios representing the exchange of fuel sources were developed, tested and analyzed, Scenario 1 being the actual operational model of the railroad. The many scenarios take into consideration the use of biodiesel blended with standard petroleum diesel at 5% (B5) and also at 25% (B25). Liquefied natural gas (LNG) was also evaluated blended with B5 and B25. After the data analysis, the results showed that if Scenario 4 was implemented, compared to Scenario 1 the railroad could gain 2.3% in energy efficiency, 139.0% in renewable energy efficiency, 32.0% in CO<sub>2</sub> emissions, 100.0% in PM, 60.0% in NO<sub>x</sub> and 12.6% in cost efficiency. The only indicator that shows worse result when comparing Scenario 4 to Scenario 1 is CO with -3.2%, due to the use of LNG. The results indicate that the proposed method can be used as a support tool to help the railroad decide what is the best mix of fuel and the best technology in order to minimize the environmental impacts and also the operational cost. The results were compared to United States Environmental Protection Agency (EPA) standards, and in some cases, achieved the highest standard.

Keywords: Eco-efficiency. Liquefied natural gas. Biodiesel. Locomotives.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PROCESSO DE COMBUSTÃO PERFEITA EM UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA .....	24
FIGURA 2- PROCESSO DE COMBUSTÃO REAL EM UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA.....	24
FIGURA 3 - PROCESSO DE REFINO DO PETRÓLEO .....	29
FIGURA 4 - CONSUMO DOS DERIVADOS DE PETRÓLEO ENTRE OS ANOS 2000 E 2011. ....	29
FIGURA 5 - FASES DA METODOLOGIA DA PESQUISA.....	40
FIGURA 6 – ESTRADA DE FERRO VITÓRIA A MINAS. ....	41
FIGURA 7 – LOCOMOTIVA BB40, UTILIZADA NOS TESTES. ....	42
FIGURA 8: VISÃO DO VAGÃO DE GNL (TGE).....	46
FIGURA 9: FORMAÇÕES POSSÍVEIS ENTRE AS LOCOMOTIVAS E VAGÃO DE GNL .....	46
FIGURA 10 - FASES DO PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DA ECO-EFICIÊNCIA. ....	54
FIGURA 11 – CONSUMO TOTAL DE ENERGIA (E).....	66
FIGURA 12 – CONSUMO TOTAL DE ENERGIA RENOVÁVEL (RE).....	67
FIGURA 13 – EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO <sub>2</sub> ).....	68
FIGURA 14 – EMISSÕES DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO).....	69
FIGURA 15 – EMISSÕES DE MATERIAL PARTICULADO (MP).....	70
FIGURA 16 – EMISSÕES DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NO <sub>x</sub> ).....	71
FIGURA 17 – EFICIÊNCIA DE CUSTO, CONSIDERANDO APENAS O CUSTO DOS COMBUSTÍVEIS. ...	72
FIGURA 18 – EFICIÊNCIA DE CUSTO, CONSIDERANDO O CUSTO DOS COMBUSTÍVEIS, INVESTIMENTO E MANUTENÇÃO EXTRA NECESSÁRIA PARA A OPERAÇÃO COM O GNL E B25. ....	72

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - EXEMPLOS DE INDICADORES DE APLICAÇÃO GERAL .....	22
TABELA 2 – ESPECIFICAÇÃO PARA O DIESEL BRASILEIRO .....	30
TABELA 3 - EVOLUÇÃO DA PORCENTAGEM DE BIODIESEL ADICIONADA AO DIESEL NO BRASIL.	31
TABELA 4 – RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	37
TABELA 5: COMPARATIVO DE CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS DE KITS TESTADOS .....	45
TABELA 6 - RESUMO DOS CENÁRIOS .....	47
TABELA 7 – MEDIDAS DE ECO-EFICIÊNCIA, OBJETIVOS E EQUAÇÕES PROPOSTAS.....	53
TABELA 8 – PLANILHA DE TESTE DE CONSUMO (VISÃO PARCIAL – PONTO 4).....	60
TABELA 9 – CONSUMO DE COMBUSTÍVEL POR HORA PARA CADA TIPO DE LOCOMOTIVA .....	61
TABELA 10 – EMISSÕES DO B5 POR LOCOMOTIVAS BB40 (VISÃO PARCIAL) .....	62
TABELA 11 – PODER CALORÍFICO, FATORES DE EMISSÃO E CUSTOS DOS COMBUSTÍVEIS.....	63
TABELA 12 – PADRÃO DE EMISSÃO PARA LOCOMOTIVAS DEFINIDO PELA EPA.....	65
TABELA 13 – RESUMO DOS RESULTADOS .....	74
TABELA 14 – RESULTADO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE. (TKB/US\$).....	74
TABELA 15 –RESULTADOS NORMALIZADOS .....	76

## LISTA DE SIGLAS

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

API - *American Petroleum Institute*

B5 - mistura de 5% de biodiesel e 95% óleo diesel comum

B6 - mistura de 6% de biodiesel e 94% óleo diesel comum

B7 - mistura de 7% de biodiesel e 93% óleo diesel comum

B20 - mistura de 20% de biodiesel e 80% óleo diesel comum

B25 - mistura de 25% de biodiesel e 75% óleo diesel comum

BNDES - Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social

CAPEX - *Capital expenditure*

CCPA - *Canadian Chemical Producers Association*

CCO - Centro de Controle Operacional

CEBDS - Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável

CMA - *Chemical Manufacturers Association*

CO - monóxido de carbono

CO<sub>2</sub> - dióxido de carbono

Conama - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CVRD - Companhia Vale do Rio Doce

DEA - *Data Envelopment Analysis*

DfE - *Design for Environmental*

ECO-92 - Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento

EEA - *European Environment Agency*

EEMP - *Eco-efficiency Management Program*

EIA-RIMA - Estudos de Impacto Ambiental e Relatórios de Impacto sobre o Meio Ambiente

EPA - *United States Environmental Protection Agency*

GEE - gases de efeito estufa

GNL - gás natural liquefeito

GRI - *Global Reporting Initiative*

HC - hidrocarbonetos

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

LCIA - *Life Cycle Impact Assessment*

MP - material particulado

MP<sub>2,5</sub> - Partículas Inaláveis Finais

NO<sub>x</sub> - óxido de nitrogênio

OCDE - *The Organization for Economic Co-operation and Development*

ONG - Organizações Não Governamentais

PML - Produção Mais Limpa

PTS - Partículas Totais em Suspensão

QFD - *Quality Function Deployment*

RSC - Responsabilidade Social Corporativa

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

STEP - Strategies for Today's Environmental Partnership

TAC - Termo de Ajustamento de Conduta

TQEM - Administração da Qualidade Ambiental Total

TQM - *Total Quality Management*

TKB - Tonelada vezes quilômetro bruto

UNCTAD - *United Nations Conference on Trade and Development*

UNEP - *United Nations Environment Programme*

WBCSD - *World Business Council of Sustainable Development*

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	OBJETIVO.....	14
1.1.1	Geral.....	14
1.1.2	Específico.....	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	14
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
2.1	OBJETIVOS GERAIS E PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DA WBCSD.....	18
2.2	PRINCÍPIOS DOS INDICADORES DE ECO-EFICIÊNCIA.....	19
2.3	MENSURAÇÃO DA ECO-EFICIÊNCIA.....	20
2.3.1	Tipo de indicadores.....	21
2.3.2	Categoria, aspecto e indicadores.....	22
2.4	EMISSÕES DE POLUENTES.....	23
2.4.1	Monóxido de carbono (CO).....	25
2.4.2	Óxido de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ).....	26
2.4.3	Material particulado (MP).....	26
2.4.4	Gases de efeito estufa (GEE).....	27
2.5	COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS EM LOCOMOTIVAS.....	28
2.5.1	Óleo Diesel.....	28
2.5.2	Biodiesel.....	31
2.5.3	Gás Natural Liquefeito.....	32
2.6	REVISÃO DA LITERATURA.....	32
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>39</b>
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PESQUISA.....	39
3.2	ETAPAS DA METODOLOGIA DE PESQUISA.....	40
3.3	UNIDADE DE ANÁLISE PARA ESTUDO DE CASO.....	41
3.4	CENÁRIOS PROPOSTOS.....	47
<b>4</b>	<b>MÉTODO PROPOSTO PARA CÁLCULO DA ECO-EFICIÊNCIA DE LOCOMOTIVAS</b> .....	<b>48</b>
4.1	MÉTODO DE CÁLCULO DOS INDICADORES.....	48
4.1.1	Consumo de energia total (eiE).....	49
4.1.2	Consumo Total de Energia Renovável (eiRE).....	49
4.1.3	Emissão total de dióxido de carbono (eiCO <sub>2</sub> ).....	50
4.1.4	Emissões de Monóxido de Carbono (eiCO), Óxido de Nitrogênio (eiNO <sub>x</sub> ) e Material Particulado (eiPM).....	50

4.1.5	Eficiência dos Custos (eiCE) .....	51
4.1.6	Medidas de Eco-eficiência.....	52
4.1.7	Procedimento Para a Avaliação da Eco-Eficiência .....	53
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>59</b>
5.1	CONSUMO.....	59
5.2	EMISSÕES .....	61
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>66</b>
6.1	CONSUMO TOTAL DE ENERGIA (E).....	66
6.2	CONSUMO TOTAL DE ENERGIA RENOVÁVEL (RE).....	67
6.3	EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO <sub>2</sub> ) .....	67
6.4	EMISSÕES DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO).....	68
6.5	EMISSÕES DE MATERIAL PARTICULADO (MP).....	69
6.6	EMISSÕES DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NO <sub>x</sub> ) .....	70
6.7	EFICIÊNCIA DE CUSTO .....	71
6.8	ANÁLISE GERAL.....	73
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As ferrovias brasileiras transportaram mais de 460 milhões de toneladas de carga em 2014 e é esperado que em 2016 transportem mais de 550 milhões. A maior parte da carga transportada sobre trilhos no país consiste de minério de ferro e carvão, alcançando 75% do total (ANTF, 2014). Este enorme volume de bens transportados implica na emissão de milhares de toneladas de poluentes na atmosfera.

Mais de um quinto deste volume é transportado pela Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), localizada no sudeste do país. Com 905 quilômetros de extensão, a ferrovia transporta aproximadamente de 119 milhões de toneladas de minério de ferro anualmente, assim como mais de 20 milhões de toneladas de carga geral (soja, milho, fertilizantes, carvão, aço, etc.). Sua frota é composta por mais de 300 locomotivas e 14.000 vagões e é operada pela Vale S.A., uma das maiores mineradoras do mundo e a maior exportadora mundial de minério de ferro.

Buscando quantificar o impacto ambiental causado pela operação das locomotivas no transporte ferroviário em uma base anual e oferecer alternativas ecologicamente mais amigáveis para reduzi-lo, esta dissertação propõe um método para avaliar as emissões atmosféricas, eficiência energética e custos oriundos do uso de diferentes combustíveis substitutos ao petróleo nas operações ferroviárias, comparando ao mesmo tempo seu desempenho com o combustível tradicional, composto por 5% de biodiesel e 95% de óleo diesel comum, denominado B5. O método consiste em uma evolução dos tradicionais programas de eficiência energética que focam na redução do consumo para uma nova abordagem que avalia o custo/benefício para aperfeiçoar os aspectos econômicos e ambientais do negócio. Vale citar que nos Estados Unidos da América há forte regulamentação de emissões para o setor ferroviário, o que não ocorre no Brasil. Desta forma, os limites de emissão de poluentes adotados no estudo seguiram os padrões americanos.



## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Geral

O objetivo desta dissertação é propor um método para avaliar a eco-eficiência da operação das locomotivas de uma ferrovia, nacional ou internacional, de carga ou de passageiro, que leve em consideração os impactos ambientais e os custos associados à utilização de combustíveis alternativos.

### 1.1.2 Específico

Os objetivos específicos incluem:

- Realizar um levantamento das emissões de gases e particulados para o modelo operacional atual da EFVM;
- Realizar o levantamento de combustíveis alternativos já testados em locomotivas da EFVM;
- Realizar a comparação e análise dos resultados, indicando o melhor mix de combustível para a EFVM, considerando sua eco-eficiência;
- Realizar uma análise de combustíveis alternativos em comparação ao combustível padrão, diesel B5, utilizados na Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), analisando seus resultados numa ótica financeira e ambiental.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O modo ferroviário responde por parcela significativa do transporte de bens no país levando-se em consideração o peso transportado e, caso os planos de investimento do governo e do setor privado se concretizem, representará uma fatia maior ainda no futuro.

O estudo em questão é de grande valia tanto para o campo da pesquisa, por conta de poucos artigos e trabalhos voltados para a mensuração dos impactos ambientais causados por ferrovias brasileiras e internacionais, bem como para estudo e avaliação do cenário atual da ferrovia e sugestões de melhorias em relação aos combustíveis utilizados.

A emissão de poluentes provenientes da queima de combustíveis fósseis causa danos à saúde humana, e os custos para tratamentos de saúde devido à inalação de poluentes são cada vez maiores para diversos governos ao redor do mundo. O monóxido de carbono em baixas concentrações pode causar fadiga e dores no peito. Os óxidos de nitrogênio causam dificuldade respiratória, alteração na defesa dos pulmões e agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares. Além disso, aumenta a sensibilidade à asma e bronquite principalmente em crianças, idosos e grupos de risco (CETESB, 2014). No meio ambiente, ao ser oxidado na atmosfera, o óxido de nitrogênio produz o ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) responsável pela elevação do grau de acidez na chuva. A chuva ácida ao incidir na superfície altera a composição química do solo e das águas, atinge as cadeias alimentares, destrói florestas e lavouras, corrói estruturas metálicas, entre outros. Já o material particulado pode ser inalado, causando problemas respiratórios. O dióxido de carbono, por sua vez, trata-se de um gás de efeito estufa (GEE) e acarreta no aumento da temperatura média no planeta, afetando as formas de vida existentes.

Há iniciativas em diversos países para a redução das emissões geradas pela operação ferroviária. Um forte exemplo são os Estados Unidos da América, que regulam as emissões ferroviárias por meio da *United States Environmental Protection Agency* (EPA). A partir de Janeiro de 2015, todos os operadores ferroviários americanos tiveram que se sujeitar ao padrão TIER 4 de emissões, o mais restritivo da história dos Estados Unidos até o momento, tendo gerado vultosos investimentos dos fabricantes de locomotivas para atender às exigências (EPA, 2012).

Portanto, pode-se perceber a importância econômica e ambiental de se reduzir a emissão de poluentes em todos os modais de transporte, inclusive o ferroviário, mantendo-se ao mesmo tempo a viabilidade financeira das soluções adotadas.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos. O Capítulo 2 trata da eco-eficiência, discorrendo sobre a eco-eficiência e suas particularidades, métodos e cálculo e a explicação sobre as principais emissões causadas pela queima de combustíveis fósseis, bem como seus

impactos para saúde humana e para a natureza. O Capítulo 3 trata da metodologia, além de apresentar ao leitor a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) e os cenários de mistura de combustíveis propostos. O Capítulo 4 apresenta o método proposto para cálculo da eco-eficiência no transporte ferroviário,. O Capítulo 5 apresenta os materiais e métodos utilizados para execução do trabalho, contendo o levantamento de dados de consumo e emissões. O Capítulo 6 apresenta os resultados e análises parciais. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões desta dissertação.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A avaliação de desempenho sob o enfoque tradicional privilegia aspectos econômicos financeiros em detrimento aos socioambientais, criando a cultura de que as questões ambientais aumentam os custos e assim, prejudicam o desempenho econômico das empresas. O conceito da eco-eficiência surgiu para desmistificar esse fato, de forma a expor que é possível unir as ideias aparentemente antagônicas de desempenho econômico-financeiro e de redução de impactos ambientais (LEAL JUNIOR, 2010).

Os conceitos e questões referentes à eco-eficiência surgiram a partir de uma proposta empresarial de atuação na área ambiental na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (ECO-92), ocorrida na cidade do Rio de Janeiro em 1992 (LEAL JUNIOR, 2010).

Na época, um concurso foi promovido para descobrir qual seria a melhor ideia que colaborasse para a implantação do desenvolvimento sustentável nas empresas, de forma a converter esse conceito em algo prático e imediato. Assim sendo, a ideia ganhadora foi a eco-eficiência. Vale a pena ressaltar que a necessidade de se produzir mais com menos recursos, menos desperdícios e menos poluição já existia, porém, a metodologia proposta pela *World Business Council of Sustainable Development* (WBCSD) (WBCSD, 2000) referia-se a ecologia, a economia e a eficiência de maneira inovadora até então (HOLLIDAY *et al.* 2002).

O WBCSD é um conjunto de 130 empresas internacionais que compartilham de um mesmo compromisso: o desenvolvimento sustentável. A rede de membros que compõe a coligação possui mais de 30 países envolvidos e 20 setores fundamentais da indústria mundial em busca do mesmo objetivo: atuar como gerador de mudanças e estimular a cooperação entre a administração pública, o setor privado e as demais organizações preocupadas com o desenvolvimento sustentável. As principais áreas que recebem atenção pela metodologia são (WBCSD, 2000):

- Comunicação da sustentabilidade;
- Sustentabilidade por meio do mercado;

- Inovação e desenvolvimento de novas tecnologias;
- Estudos sobre clima e energia;
- Preservação dos recursos naturais.

A eco-eficiência de acordo com a WBCSD (2000), pode ser definida como a entrega de bem e serviços a preços competitivos e que ao mesmo tempo satisfaçam às necessidades humanas, resultem em uma melhor qualidade de vida e reduzam de forma gradativa as influências ambientais e a intensidade do uso dos recursos em todas as etapas do ciclo de produção de um bem ou serviço.

Outra definição é dada por Salgado (2007), em que a eco-eficiência pode ser considerada uma filosofia voltada para gestão e que estimula as empresas a buscarem melhorias ambientais que potencializem benefícios econômicos. Além disso, permite novas oportunidades de negócio, tornar as empresas mais lucrativas e desenvolver o lado ambiental de maneira mais responsável. Um ponto chave nas vantagens citadas é a fomentação das inovações e, por conseguinte, o crescimento e a competitividade.

De forma geral, as empresas e indústrias existem para satisfazer as necessidades e desejos do homem e assim, serem recompensadas com os lucros gerados pela venda. Os negócios com visão responsável sobre o meio ambiente consideram a melhoria na qualidade de vida como um dos fatores-chaves que os levaram a ser mais sustentáveis. Entretanto, apenas essa visão dentro do mundo empresarial não garante a redução do consumo de insumos e dos impactos ambientais. Essa meta apenas será atingida quando o mundo empresarial começar a trabalhar de maneira conjunta com o governo e as demais partes interessadas, como fornecedores, clientes e organizações não governamentais (ONG's) (WBCSD, 2000).

## 2.1 OBJETIVOS GERAIS E PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DA WBCSD

O método da eco-eficiência apresentada pela WBCSD determina três principais objetivos (MOREIRA, 2009):

1. Redução do consumo de insumos naturais: diminuição do uso dos recursos naturais de cunho material e energético, além da preocupação sobre a reciclagem e a durabilidade dos produtos;
2. Redução dos fatores que impactam negativamente o meio ambiente: redução da emissão de gases poluentes, descargas líquidas e propagação de possíveis substâncias tóxicas;
3. Aumento do valor do produto ou serviço: criação de novos serviços que tenham o intuito de agregar valor ao produto e assim beneficiar os clientes.

Schaffel (2010) assinalou sete principais componentes indicados pela WBCSD como aqueles que contribuem para melhorar os índices de eco-eficiência:

- 1) Redução do consumo de energia com bens e serviços (minimização da intensidade energética de bens e serviços);
- 2) Redução do consumo de materiais (minimização da intensidade de materiais de bens e serviços);
- 3) Redução da dispersão de substâncias tóxicas;
- 4) Aumento da reciclabilidade dos materiais;
- 5) Maximização do uso sustentável de recursos renováveis;
- 6) Prolongamento do ciclo de vida e durabilidade dos produtos;
- 7) Agregação de valor aos bens e serviços.

## 2.2 PRINCÍPIOS DOS INDICADORES DE ECO-EFICIÊNCIA

Os indicadores selecionados pela empresa devem seguir os seguintes princípios (WBCSD, 2000):

- 1) Ser relevante na proteção do meio ambiental, na saúde dos seres humanos e na melhoria da qualidade de vida: os indicadores devem garantir que as empresas e as partes interessadas concentrem seus esforços nas áreas prioritárias tanto no aspecto ambiental quanto na agregação de valor ao produto;
- 2) Fornecer informações aos órgãos de decisão de forma a melhorar o desempenho da organização: a função primordial dos indicadores é de ajudar a gestão a tomar decisões no que diz respeito às modificações nos processos produtivos, fazendo com o que a utilização de recursos seja reduzida e/ou o aumento do valor do produto. Em último caso, também servem para a análise do desempenho da empresa;

- 3) Reconhecer a diversidade presente em cada negócio: devem-se levar em consideração as diferenças existentes em cada tipo de negócio para assim selecionar indicadores que sejam importantes e significativos, de forma a conseguir retratar a realidade.
- 4) Apoiar o *benchmarking* e monitorar a evolução: é imprescindível que a gestão use indicadores os quais suas evoluções possam ser medidas de forma histórica. Com o intuito de maximizar o poder de monitoramento, os indicadores devem ser calculados visando minimizar a influência de fatores externos que afetem tanto o impacto ambiental quanto o valor do produto. Além disso, os indicadores obrigatoriamente devem se basear em sistemas de medição sólidos, atemporais e reproduzíveis.
- 5) Serem claramente definidos, mensuráveis, transparentes e verificáveis: com o propósito de servir como apoiadores na tomada de decisão, os indicadores devem ser claros e calculados de maneira precisa ou por estimativas confiáveis. Assim sendo, todo o processo de cálculo, as fronteiras e as considerações feitas devem ser documentadas e disponíveis para os colaboradores.
- 6) Serem compreensíveis e significativos para as diversas partes interessadas: os indicadores devem ser simples e claros, de forma a facilitar seu uso tanto para a empresa tanto para as demais partes interessadas. É importante ressaltar que qualquer agregação de dados deve ser feita de forma clara e cuidadosa, deixando evidentes quais as limitações foram encontradas.
- 7) Basear-se numa avaliação geral da atividade da empresa (produtos e/ou serviços), sobretudo concentrando-se naquelas áreas controladas diretamente pela gestão: a empresa deve examinar toda a empresa em busca do conhecimento amplo, de forma a priorizar a criação de indicadores para aquelas áreas nas quais a gestão possui controle direto e pode influenciar de maneira mais assídua.
- 8) Levar em consideração questões relevantes e significativas, relacionadas com as atividades da empresa a montante (fornecedores) e a jusante (os clientes): a gestão não deve deixar de lado as áreas da empresa as quais não possui controle total (por exemplo, produção de matérias primas), porém o tratamento deve ser diferenciado daqueles indicadores controlados totalmente pela gestão.

### 2.3 MENSURAÇÃO DA ECO-EFICIÊNCIA

A mensuração da eco-eficiência propicia às empresas o monitoramento de suas atividades, bem como o controle e estabelecimento de metas de curto e longo prazo. O controle sobre isso

deve ser feito por todos os colaboradores envolvidos, da mesma maneira que a divulgação deve ser ampla e feita de forma clara e simples de forma a envolver todo o negócio (PEREIRA, 2001).

A Equação 1 demonstra a fórmula geral proposta pela WBCSD para mensurar a eco-eficiência:

$$\text{Eco – eficiência} = \frac{\text{Valor do produto ou serviço}}{\text{Influência ambiental}} \quad (1)$$

Não existe uma definição que indique quais devem ser os numeradores - valor do produto ou serviço - e os denominadores - influência ambiental - da Equação 1 (a WBCSD sugere alguns indicadores com base em estudos já realizados em empresas de várias partes do mundo), permitindo uma grande variedade de possibilidades dentro das necessidades do negócio e de seus *stakeholders* (PEREIRA, 2001). Vale citar que, no transporte ferroviário, ainda não foi proposto nenhum conjunto específico de numeradores e denominadores.

### **2.3.1 Tipo de indicadores**

Existem dois tipos de indicadores: 1) de aplicação geral e 2) específicos ao negócio. Os indicadores de aplicação geral, (Tabela 1) são aqueles que podem ser utilizados em praticamente qualquer tipo de empresa, indústria e/ou organização de forma a focarem em uma determinada preocupação ambiental ou valor do negócio WBCSD (2000).



Tabela 1 - Exemplos de indicadores de aplicação geral

<b>Tipo</b>	<b>Indicador</b>	<b>Serviço</b>
Valor de produto/serviço	Quantidade de produto produzido	Responsável pela mensuração de produto fabricado dentro de um horizonte de tempo
	Quantidade de serviços prestados	Responsável pela mensuração da quantidade de serviço prestado dentro de um horizonte de tempo
	Vendas líquidas	Valor total das vendas líquidas (sem os custos)
Influência ambiental	Consumo de energia	Mensuração do consumo das diversas fontes de energia
	Consumo de matéria prima	Mensuração do consumo das diversas matérias primas necessárias
	Consumo de água	Mensuração do consumo das diversas matérias primas necessárias
	Emissões de gases de efeito estufa	Mensuração dos gases produzidos em cada produto
	Emissões de substâncias deterioradoras da camada de ozônio (SDCO)	Mensuração dos gases produzidos em cada produto

Fonte: WBCSD (2000).

Já os indicadores específicos ao negócio são aqueles voltados para a especificidade de cada empresa e assim sendo limitados por sua abrangência. Vale a pena ressaltar que esse tipo não é necessariamente menos importante que os do primeiro tipo, cabendo aos responsáveis realizar essa análise. Nem todos os indicadores são aplicáveis a todas as empresas, de forma que cada uma deve avaliar seu negócio e apontar quais indicadores gerais e específicos podem e devem ser estudados.

### **2.3.2 Categoria, aspecto e indicadores**

De forma a criar uma metodologia de criação e medição de indicadores universais para todos os tipos de negócios, não excluindo as particularidades de cada setor, o WBCSD (2000) determinou uma metodologia condizente com aquelas utilizadas na série ISO 14000 e na *Global Reporting Initiative (GRI)*, englobando três níveis organizacionais:

1. Categorias: são as áreas nas quais há influência ambiental (tanto na criação quanto na utilização dos bens ou serviços) e no valor do negócio;

2. Aspectos: cada categoria possui certa quantidade de aspectos que estão relacionados entre si, com o objetivo de descrever o que será medido;
3. Indicadores: são responsáveis pela mensuração de algum aspecto individual, o qual possui diversos indicadores.

De forma resumida, os principais aspectos identificados dentro de cada categoria são (WBCSD, 2000):

- 1) Valor do produto ou serviço:
  - Volume/massa;
  - Valor monetário;
  - Função.
- 2) Influência ambiental na criação do produto ou serviço:
  - Consumo de energia;
  - Consumo de materiais;
  - Consumo de recursos naturais;
  - Saídas não relacionadas com o produto;
  - Acontecimentos imprevistos.
- 3) Influência ambiental na utilização do produto ou serviço:
  - Características do produto ou serviço;
  - Resíduos de embalagem;
  - Consumo de energia;
  - Emissões durante a utilização/emissão.

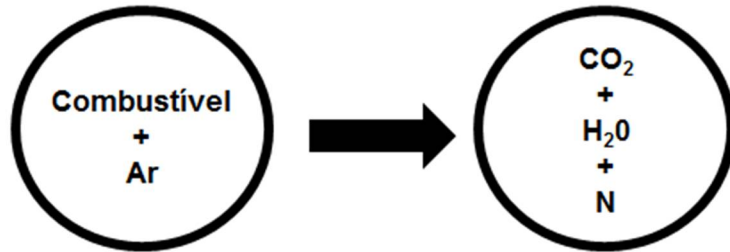
Dessa forma, a seguir será dada uma breve explicação sobre poluentes e, em seguida, serão detalhados os principais tipos de poluentes relacionados a este trabalho.

## 2.4 EMISSÕES DE POLUENTES

A poluição produzida por veículos motorizados é principalmente advinda do processo de combustão inerente à queima de diversos combustíveis, além de haver contribuição advinda do desgaste de pneus, queima e descarte de óleo lubrificante, do próprio processo de fabricação do veículo e os insumos necessários para tal, entre outros. Aqueles que são

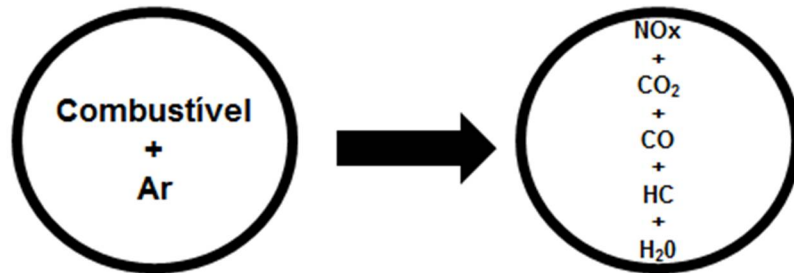
subprodutos do petróleo têm na sua composição uma mistura de hidrocarbonetos (compostos de átomos de carbono) (BARANESCU, 2003). Em um motor perfeito, o oxigênio presente no ar converteria o hidrogênio do combustível em água e o carbono em dióxido de carbono, conforme a Figura 1. Entretanto, o processo em questão não é perfeito acarretando na emissão de diversos poluentes (Figura 1) (MARTINS, 2006).

Figura 1 - Processo de combustão perfeita em um motor de combustão interna



Fonte: Martins (2006, p. 201).

Figura 2- Processo de combustão real em um motor de combustão interna



Fonte: Martins (2006, p. 201).

A partir da década de 70, os governos de diversos países se mostraram preocupados com respeito à emissão de poluentes provenientes da queima de combustíveis fósseis. Dentre as tecnologias adotadas na indústria, podem-se citar sistemas destinados a recolha dos vapores de hidrocarbonetos (HC) e sistemas de válvulas voltadas para recirculação dos gases de escape com o intuito de reduzir os níveis de NO<sub>x</sub> (óxido de nitrogênio) (MARTINS, 2006).

Apesar de todo o desenvolvimento das empresas, a quantidade de veículos e a distância percorrida ao longo dos anos cresceram drasticamente e, mesmo com as mudanças no setor, o processo de redução das emissões não foi controlado de forma eficaz. Como resultado, o nível de redução de diversos poluentes foi modesto com exceção do chumbo (em torno de 95%), devido ao fato dele ter sido banido da composição dos combustíveis no final do século passado (MOREIRA, 2012).

Os níveis de monóxido de carbono (CO), emissões de NO<sub>x</sub>, material particulado (MP) e gases de efeito estufa (GEE) seguem regulamentações em diversos países e blocos econômicos para a maior parte dos veículos incluindo automóveis, caminhões, tratores, entre outros. Vale a pena ressaltar que cada categoria citada anteriormente segue limites distintos dos demais, de forma a adequar as emissões com a realidade de cada setor (MOREIRA, 2012).

As subseções seguintes explicam cada um dos poluentes citados anteriormente, bem como a forma na qual são produzidos e os danos para a natureza e para a saúde humana.

#### **2.4.1 Monóxido de carbono (CO)**

O CO é um gás inodoro e incolor, formado tanto no processo de queima de combustíveis, sistemas de aquecimento, usinas termoelétricas a carvão, queima de biomassa e tabaco quanto em fontes naturais como atividade vulcânica, descargas elétricas e emissão de gás natural (Ministério do Meio Ambiente, 2014).

A principal via de exposição ao monóxido de carbono é a respiratória, de forma que intoxicações agudas podem ser fatais à espécie humana. Quando inalado, o gás é rapidamente absorvido pelos pulmões e já no sistema circulatório liga-se com a hemoglobina de forma estável. Assim, impede o transporte do oxigênio causando hipóxia tecidual, ou seja, baixa concentração de oxigênio nos tecidos orgânicos. Em baixa concentração, pode causar fadiga e dores no peito (CETESB, 2014).

### 2.4.2 Óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>)

O NO<sub>x</sub> é um gás poluente altamente oxidante e também de extrema importância na formação do ozônio troposférico. Além dos efeitos sobre a saúde humana, esse tipo de poluente também exerce influência nas mudanças climáticas globais. Dentre as fontes do NO<sub>x</sub>, podem-se citar: locomotivas, veículos de passeio, motores de combustão interna, usinas termoelétricas e siderúrgicas. Já as fontes naturais incluem incêndios florestais, calor gerado por relâmpagos e atividade microbiana nos solos (Ministério do Meio Ambiente, 2014).

No que diz respeito à saúde humana, os efeitos adversos da exposição em altos níveis são dificuldade respiratória, alteração na defesa dos pulmões e agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares. Além disso, aumenta a sensibilidade à asma e bronquite principalmente em crianças, idosos e grupos de risco (CETESB, 2014).

No meio ambiente, ao ser oxidado na atmosfera o óxido de nitrogênio produz o ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) responsável pela elevação do grau de acidez na chuva. A chuva ácida ao incidir na superfície altera a composição química do solo e das águas, atinge as cadeias alimentares, destrói florestas e lavouras, corrói estruturas metálicas, entre outros (ECYCLE, 2014).

### 2.4.3 Material particulado (MP)

O MP pode ser definido como um conjunto complexo de poluentes de diâmetro reduzido constituído de fumaças, poeiras e qualquer tipo de material sólido e líquido que se encontra suspenso na atmosfera por conta do seu tamanho reduzido (CETESB, 2014). A emissão em questão pode ser classificada como (ECYCLE, 2014):

- Partículas Totais em Suspensão (PTS): são as partículas cujos diâmetros aerodinâmicos são menores que 50 µm, de forma que uma parte desse material pode ser inalado e gerar problemas a saúde, enquanto outra parte afeta desfavoravelmente a qualidade de vida da população;
- Partículas Inaláveis Finais (MP<sub>2,5</sub>): são aquelas de diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm. Devido seu tamanho reduzido, podem penetrar profundamente no sistema respiratório, atingindo principalmente os alvéolos pulmonares;

- Fumaça (FMC): relacionada diretamente com o processo de combustão de combustíveis fósseis.

As principais fontes desse tipo de poluentes são a queima de combustíveis fósseis, queima de biomassa vegetal, emissões de amônia na agricultura, emissões decorrentes de obras e pavimentação de vias (Ministério do Meio Ambiente, 2014).

#### **2.4.4 Gases de efeito estufa (GEE)**

Os GEE são de grande importância para o equilíbrio do clima no planeta, permitindo a permanência e manutenção da sobrevivência da fauna e flora da Terra. Entretanto, com um desbalanceamento do nível desses gases ocorre o efeito estufa, acarretando o aumento da temperatura média no planeta e assim afetando toda a vida aqui existente (BORSARI, 2009).

As duas principais fontes responsáveis pela emissão de GEE são a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento das regiões de florestas tropicais (por exemplo, a Amazônia). Com o aumento da frota de veículos e a depredação das áreas verdes ao redor do mundo, a situação vêm se agravando ao passar dos últimos séculos e exigindo o controle dos governos (BORSARI, 2013). Os principais gases de efeito estufa são (IPAM, 2014):

- Dióxido de carbono: sua permanência na atmosfera é de pelo menos cem anos e suas principais fontes de emissão são: queima de combustíveis fósseis, queimadas e desmatamentos (responsáveis pela extinção da absorção de CO<sub>2</sub> no ar pelas plantas);
- Metano (CH<sub>4</sub>): componente primário do gás natural, o qual também é gerado pelo aparelho digestivo do gado, aterros sanitários, mineração, entre outros;
- Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O): gás liberado por microrganismos presentes no solo (durante o processo de nitrificação) e em crescente aumento de liberação para o ar devido a crescente utilização de fertilizantes;
- Clorofluorcarbonos (CFC's): amplamente utilizados em ar condicionados, aparelhos de isolamento térmico, geladeiras. Espumas. Estão diretamente ligados com a redução da camada de ozônio por reagirem com o ozônio na estratosfera;

Os principais impactos dos GEE's são: retenção de mais raios solares, ocasionando o aumento da temperatura global, derretimento das calotas polares, aumento do nível da água do mar, aceleração do processo de desertificação, desequilíbrio de ecossistemas ocasionando a extinção de espécies animais e vegetal; alteração no curso das correntes marítimas, entre outros (MOTTA, 2011).

## 2.5 COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS EM LOCOMOTIVAS

Há diversas opções de combustíveis para serem utilizados em locomotivas. Todavia, para o estudo em questão, além do tradicional óleo diesel, foram selecionados outros combustíveis alternativos para o teste, seja por exigirem menor intervenção nos motores das locomotivas, maior facilidade de fornecimento, apresentarem grandes reduções de emissão, menor custo de aquisição e estado atual da tecnologia mais avançado. A seguir, são listadas as principais características dos combustíveis testados: óleo diesel, biodiesel e gás natural liquefeito.

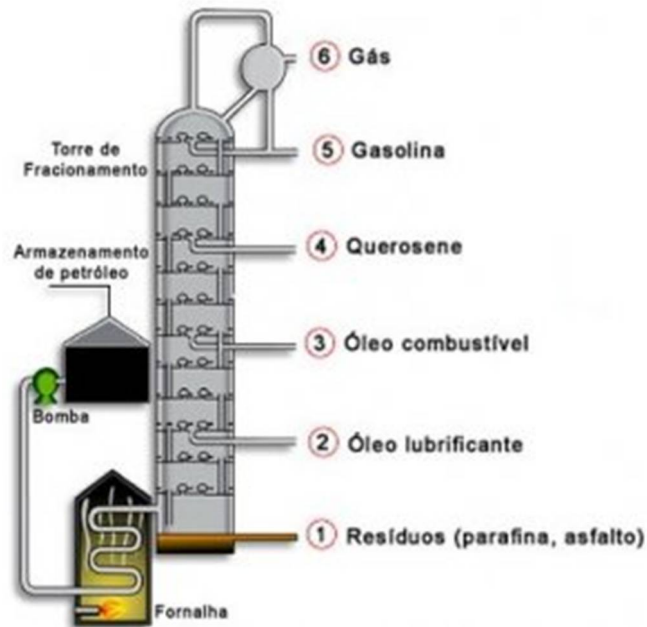
### 2.5.1 Óleo Diesel

O óleo diesel é um combustível derivado do petróleo formado majoritariamente por hidrocarbonetos (ou seja, carbono e hidrogênio) e em baixas concentrações de enxofre, oxigênio e nitrogênio. Sua produção se dá pelo processo de destilação fracionada do petróleo, a qual ocorre segundo as seguintes etapas expostas (PETROBRAS, 2015):

- 1) Primeiramente, o petróleo é aquecido por meio de vapor a uma temperatura entre 550°C e 650°C;
- 2) A maior parte do petróleo evapora, sendo encaminhado para o fundo de uma estrutura chamada de coluna de destilação fracionada, a qual possui diversos níveis com bandejas;
- 3) Essa estrutura possui diversos orifícios com o intuito de permitir a passagem do vapor entre os níveis. Além disso, as bandejas são responsáveis pelo aumento do tempo de contato entre o vapor e os líquidos presentes na coluna;
- 4) Cada nível da coluna de destilação possui uma diferente temperatura (o topo é o nível mais frio e a base mais quente);
- 5) O vapor sobe pela coluna e assim ele vai sendo resfriado conforme passa por cada um dos níveis, de forma a condensar quando sua temperatura é igual ao do nível no qual se encontra;

- 6) Dessa forma, as bandejas recolhem o material condensado e em seguida esses materiais podem ser condensados mais uma vez de forma a atingir certa temperatura e serem armazenados ou seguirem para outros locais para passar por outros processos.

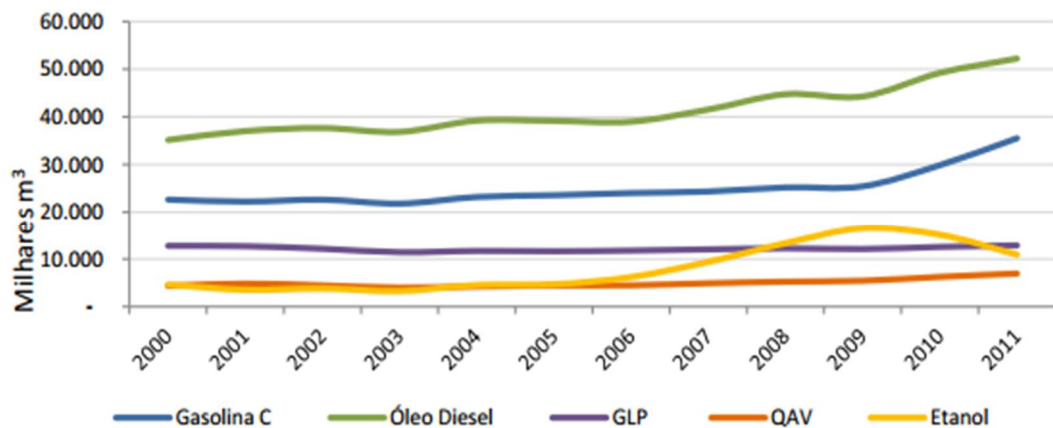
Figura 3 - Processo de refino do petróleo



Fonte: Petrobras (2015).

Dentre o período dos anos 2000 e 2011 o consumo dos derivados do petróleo apresentou uma variação conforme a Figura 4. O percentual de crescimento do consumo dos produtos segue, na maioria dos casos, o crescimento do PIB brasileiro (ANP, 2013).

Figura 4 - Consumo dos derivados de petróleo entre os anos 2000 e 2011.



Fonte: ANP (2013)



A ANP é a agência responsável por especificar as características do óleo diesel brasileiro, que podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificação para o Diesel brasileiro

CARACTERÍSTICA (1)	UNIDADE	LIMITE		MÉTODO
		TIPO A e B		ABNT NBR
		S10	S500	
Aspecto (2)	-	Límpido e isento de impurezas		14954
Cor	-	-3	Vermelho (4)	
Cor ASTM, máx. (5)	-	3		14483
Teor de biodiesel (6)	% volume	-7		15568
Enxofre total, máx.	mg/kg	10,0 (8)	-	-
		-	500	14533
Destilação				
10% vol., recuperados, mín.	°C	180	Anotar	9619
50% vol., recuperados		245,0 a 295,0	245,0 a 310,0	
85% vol., recuperados, máx.		-	360	
90% vol., recuperados		-	Anotar	
95% vol., recuperados, máx		370	-	
Massa específica a 20°C	kg/m <sup>3</sup>	815,0 a 850,0 (10)	815,0 a 865,0	7148
				14065
Ponto de fulgor, mín.	°C	38		7974
				14598
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	2,0 a 4,5	2,0 a 5,0	10441
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	-11		14747
Número de cetano, mín. ou Número de cetano derivado (NCD), mín.	-	48	42 (12)	-
Resíduo de carbono Ramsbot-tom no resíduo dos 10% finais da destilação, máx.	% massa	0,25		14318
Cinzas, máx.	% massa	0,01		9842
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx	-	1		14359
Teor de Água (13), máx.	mg/kg	200	500	-
Contaminação total (14), máx.	mg/kg	24	-	-
Água e sedimentos, máx. (14)	% volume	0,05		-
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (15), máx.	% massa	11	-	-
Estabilidade à oxidação (15), máx.	mg/100mL	2,5	-	-
Índice de neutralização	mg KOH/g	Anotar	-	14248
Lubricidade, máx.	µm	-18		
Condutividade elétrica, mín. (19)	pS/m	25	25 (20)	-

Fonte: Resolução ANP Nº 50, DE 23.12.2013

### 2.5.2 Biodiesel

O biodiesel é um combustível de queima limpa, derivado de fontes naturais e renováveis como os vegetais. Tal qual o diesel derivado de petróleo, o biodiesel opera em motores de ignição-combustão. O uso do biodiesel em motores convencionais a diesel resulta na redução substancial de hidrocarbonetos, monóxido de carbono e matéria particulada (LOBO *et al.*, 2009).

Entre suas vantagens, ele é um combustível simples de ser usado, biodegradável, não tóxico e essencialmente livre de compostos sulfurados e aromáticos. A Tabela 3 mostra porcentagem de biodiesel utilizado no Brasil ao longo dos anos. A nomenclatura adotada é formada da seguinte forma: a letra B indica a presença de biodiesel e o número precedente a porcentagem desse combustível na mistura, ou seja, B6 indica 6% de biodiesel e 94% de diesel (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Tabela 3 - Evolução da porcentagem de biodiesel adicionada ao diesel no Brasil

<b>Ano</b>	<b>Percentual de Biodiesel misturado ao Diesel</b>
2005 a Junho/2008	2%
Julho/2008 a Junho/2009	3%
Julho/2009 a Dezembro/2009	4%
Janeiro/2010 a Junho/2014	5%
Julho/2014 a Outubro/2014	6%
Novembro/2014 até hoje	7%

Fonte: Petrobras (2015).

Podem-se citar as seguintes vantagens na utilização do biodiesel (OLIVEIRA, SUAREZ e SANTOS, 2013):

- Trata-se de uma fonte de energia renovável;
- É constituído de carbono neutro, sendo neutralizado pelas plantas;
- Contribui para geração de empregos no setor primário da economia, de forma a fomentar o desenvolvimento do governo brasileiro;
- Grande parte dos veículos utilizados para transporte na indústria da agricultura utilizam o diesel, podendo assim ocorrer a substituição pelo biodiesel;

- Ganho ambiental para todo o planeta com a redução dos gases poluentes;
- A viabilidade do uso direto foi comprovada na avaliação dos componentes do motor, que não apresentaram qualquer tipo de resíduo que comprometesse o desempenho;
- É uma fonte de energia limpa e renovável.

O Brasil faz uso de menos de um terço da sua área agricultável. O potencial para o plantio é de aproximadamente 150 milhões de hectares, sendo 90 milhões referentes às novas fronteiras e 60 milhões que podem ser exploradas com o intuito agrícola em curto prazo. O Programa Biodiesel visa à utilização apenas de terras inadequadas para o plantio de gêneros alimentícios (BIODIESEL, 2015). No Brasil há uma grande diversidade de opções para a produção do biodiesel, tais como a palma, o babuçu, a soja, o girassol, o amendoim, a mamona e o dendê (BIODIESEL, 2015).

### **2.5.3 Gás Natural Liquefeito**

O comércio do gás natural liquefeito (GNL) no Brasil é regulado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), responsável pelos padrões de combustíveis derivados de petróleo, gás natural e biocombustíveis (ANP, 2014). É esta agência que determina os limites superiores e inferiores de cada componente dos combustíveis comercializados no país. O GNL consiste principalmente de metano, com concentração mínima de 85%, conforme requerido pela ANP para a região sudeste do país. O gás natural é originado a partir de restos mortais de plantas e animais sujeitos a grandes pressões impostas por uma camada extensa de solo e rocha sobre os mesmos durante vários séculos (Baumel, 2013).

## **2.6 REVISÃO DA LITERATURA**

A revisão da literatura é realizada nesta seção considerando alguns dos principais artigos sobre combustíveis alternativos, locomotivas e emissões de ferrovias, assim como os impactos ambientais deste modo de transporte.

Carraretto *et al.* (2004) investigaram o potencial do biodiesel como combustível alternativo em motores a diesel de ônibus urbanos. Distâncias, consumos e emissões (CO<sub>2</sub>, CO, HC e NO<sub>x</sub>) foram monitorados. Além disso, o desgaste de componentes mecânicos, filtros de óleo, filtros de ar, sujeira e degradação do lubrificante foram verificados. Além disso, a emissão líquida total de CO<sub>2</sub> durante todo o ciclo de vida também foi estudada. Eles descobriram que as emissões de CO diminuíram, mas por outro lado aumentaram as emissões de NO<sub>x</sub> e que os tubos de borracha e juntas de vedação devem ser substituídos uma vez que eles não são compatíveis com o combustível.

Plakhotnik *et al.* (2005) apresentou uma análise da situação ecológica no transporte ferroviário da Ucrânia com um foco específico nas ferrovias regionais da Prydniprov'ska. Poluentes foram encontradas em larga escala e uma comparação do impacto ambiental das diferentes subdivisões ferroviárias foi apresentada. Além disso, um simulador de computador foi desenvolvido para permitir uma análise comparativa de dados. O documento só levou em conta fontes de emissão estacionárias, como oficinas de vagões e locomotivas. O estudo não levou em consideração as emissões produzidas pela operação do material circulante.

Lapuerta *et al.* (2007) recolheu e analisou os trabalhos escritos, principalmente em revistas científicas, sobre emissões de motores diesel utilizando biodiesel em oposição ao óleo diesel convencional. A primeira seção é dedicada ao efeito do biodiesel na potência do motor, consumo de combustível e eficiência térmica, enquanto a segunda seção foca na comparação das emissões dos motores com biodiesel e diesel, com especial atenção para as emissões dos óxidos de nitrogênio e particulados, este último não só em composição e massa, mas também em distribuição de tamanho. Neste último caso, foi encontrado o maior consenso na redução drástica das emissões de partículas.

Mazzoleni *et al.* (2007) conduziram um experimento de campo para avaliar os impactos das emissões pelo uso de uma mistura de 20% de biodiesel (B20) em uma frota de ônibus escolares. Numerosos estudos laboratoriais citaram redução do monóxido de carbono, hidrocarbonetos, e emissão de partículas, enquanto há um ligeiro aumento das emissões de óxidos de nitrogênio em motores operando com biodiesel e/ou misturas de biodiesel em relação ao diesel de petróleo. Um sensor remoto comercial foi utilizado para medir os fatores

de emissão de gases. O experimento revelou que a emissão de material particulado aumentou em até 1,8 vezes após a mudança do diesel de petróleo para B20, contrariando a principal corrente da literatura que indica redução. A análise do biodiesel utilizado encontrou altas concentrações de glicerina livre e ponto de fulgor reduzido, o que indica separação e processamento inadequados do biodiesel durante a produção. Portanto, o biodiesel utilizado não estava em conformidade com a norma ASTM D6751, que padroniza as características do biodiesel nos EUA. O resultado do estudo reforça a importância do processo de produção dos combustíveis alternativos, uma vez que os benefícios potenciais de redução de emissão podem ser diminuídos ou mesmo revertidos caso não haja o controle de qualidade adequado.

Papagiannakis *et al.* (2009) realizaram uma investigação experimental para examinar os efeitos das emissões de um motor diesel onde o combustível diesel é parcialmente substituído por gás natural em várias proporções, sendo fumigado no coletor de admissão juntamente com o ar de admissão. Os resultados experimentais revelam o efeito destes parâmetros sobre os óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, hidrocarbonetos e emissões de fuligem, assim como o efeito benéfico da presença de gás natural. Foi concluído que a combustão do diesel utilizando do gás natural como um suplemento é uma técnica promissora para controlar as emissões de  $\text{NO}_x$  e de particulados nos motores a diesel, requerendo apenas pequenas modificações da estrutura do motor. As desvantagens observadas foram um aumento das emissões de hidrocarbonetos (HC) e CO, o que pode ser mitigado por meio da regulagem do motor, de forma que o tempo de injeção do diesel líquido seja alterado para potências intermediárias do motor.

Xue *et al.* (2010) analisaram os relatórios sobre o desempenho de motores diesel e suas emissões utilizando misturas de biodiesel como combustível, publicados em periódicos conceituados desde o ano 2000. Foram analisados os efeitos do biodiesel sobre a potência do motor, economia, durabilidade e emissões. Verificou-se que a utilização de biodiesel leva a uma redução substancial em MP, HC e CO, acompanhado de uma pequena perda de energia, aumento do consumo de combustível e aumento de emissões de  $\text{NO}_x$ .

Macor *et al.* (2011) testaram dois caminhões abastecidos com 30% de mistura de biodiesel (B30) e diesel puro em laboratório sob condições de condução normais, a fim de avaliar o

consumo de combustível e emissões de CO, HC, NO<sub>x</sub> e PM. Após substituição do óleo diesel com B30 foram observados os seguintes resultados: o consumo de combustível aumentou em proporção ao percentual da mistura, em função do menor poder calorífico do biodiesel. Em desacordo parcial com os dados da literatura, as emissões de CO e HC mostraram um ligeiro aumento, enquanto que as emissões de NO<sub>x</sub> não variaram. Deve-se notar que essas variações não passaram no teste de significância estatística. Ao contrário, o material particulado mostrou redução significativa.

Poompipatpong e Cheenkachorn (2011) modificaram um motor diesel para o funcionamento a gás natural e avaliaram os efeitos na emissão e potência do mesmo. O documento cita que vários estudos têm sido publicados mostrando a redução do consumo de diesel e da mistura de diesel com biodiesel, assim com das emissões (Bhattacharya, 2010; Can, 2007; Cheenkachorn, 2009; Caro 2001), etanol (Can, 2004), éteres (Canção, 2002), e injeção de diesel com gás natural (Papagiannakis de 2003, Papagiannakis, 2010; Selim de 2001, Zárante de 2009). Também é mencionado que duas das vantagens do gás natural são a combustão limpa e preço atraente. O estudo foi capaz de testar as emissões de CO, THC e NO<sub>x</sub> para diferentes taxas de compressão e comparar os resultados.

Abdelaal e Hegab (2012) testaram um motor diesel monocilíndrico de injeção direta em funcionamento regular e em modo *dual-fuel*, com gás natural como o principal combustível e óleo diesel como um piloto para ignição. Os resultados comparativos de emissões foram apresentados para vários modos de operação. Foi mencionado que o gás natural como um suplemento parcial para o diesel é uma solução bastante promissora para reduzir as emissões de poluentes, particularmente os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e material particulado (PM). Os resultados mostraram redução nas emissões de NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub>, enquanto que as emissões de monóxido de carbono (CO) aumentaram.

Park *et al.* (2012) analisaram as emissões de material particulado (MP) de um motor diesel de uma locomotiva para diferentes potências de trabalho do motor. Gases de exaustão do motor diesel foram recolhidos por meio de um aparelho e a concentração e distribuição dos tamanhos de partículas finas foram medidas por um dimensionador de partículas. Os resultados mostraram que a emissão de monóxido de carbono máxima foi atingida a 59% da

potência nominal máxima do motor, sendo que após este ponto as emissões diminuíram. O diâmetro médio das partículas aumentou com o aumento de potência do motor, até atingir um pico em 40% da potencia nominal máxima.

Cheenkachorn *et al.* (2013) estudaram os efeitos do gás natural liquefeito (GNL) em um motor diesel. O gás natural foi usado como combustível primário, enquanto uma quantidade de diesel foi usada como uma fonte de ignição (piloto). A quantidade de cada combustível foi ajustada para obter o mesmo torque e potência originais, sem a incidência de *knocking* (ou pré-ignição). O desempenho do motor e suas emissões em modo diesel e *dual-fuel* foram conduzidos para a faixa de rotação de 1.100 a 1.900 rpm, enquanto parâmetros como torque, potência e consumo específico de combustível eram observados. As emissões comparadas foram: total de hidrocarbonetos (THC), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e monóxido de carbono (CO). Os resultados mostraram que a proporção máxima de gás natural na mistura durante a operação do motor foi de 77,90% a 1300 rpm. Comparado com a operação com óleo diesel apenas, as emissões de CO e THC foram superiores, enquanto as emissões de NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> foram menores.

Johnson *et al.* (2013) descreveu e aplicou uma técnica para analisar as emissões de escape de locomotivas não modificadas sob condições reais de operação, em trens de um porto australiano. O método utilizou medições simultâneas na linha ferroviária dos seguintes poluentes; material particulado, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub>, a partir do qual os fatores de emissão foram então derivados. Amostras de 56 manobras de trens foram coletadas, analisadas e apresentadas. Os resultados quantitativos para fatores de emissão foram comparados com trabalhos publicados anteriormente. Foram encontradas correlações estatisticamente significativas dos fatores de emissão para os seguintes poluentes: material particulado, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>.

Ésteres e Marinov (2014) compararam os métodos utilizados para calcular as emissões de locomotivas no Reino Unido com base no seu tipo e modo de operação. Os três modos sob comparação foram: diesel, elétrica e bicomcombustível. Bem como a comparação entre estes três modos de operação, uma comparação entre os modos convencional, carga geral e alta velocidade foi feita. Combustíveis alternativos foram considerados para o modo diesel e

bicombustível e comparados com base no seu impacto ambiental. Foi possível concluir que os trens a diesel produzem menos emissões do que trens elétricos quando resistências mecânicas e do ar são levadas em consideração, e que os combustíveis alternativos, como o biodiesel, devem ser levados em consideração para o futuro do transporte ferroviário, uma vez que as emissões caem drasticamente com o aumento do teor de biodiesel no combustível original.

Gangwar e Sharma (2014) analisaram o setor do transporte ferroviário na Índia, que foi classificado como "o modo de transporte mais amigo do meio ambiente" no país. Uma abordagem "*well-to-wheel*" foi adotada para quantificar as emissões de locomotivas a diesel e elétricas, a partir da qual foi possível concluir concluiu que a pegada de carbono acumulada do funcionamento das locomotivas elétricas é maior. Foi sugerida uma mistura de ambas as formas de tração para alcançar um equilíbrio entre eficácia ambiental, sustentabilidade e equidade.

A Tabela 4 apresenta um resumo da revisão bibliográfica, contendo o nome dos autores, ano, revista e país onde a pesquisa foi conduzida.

Tabela 4 – Resumo da revisão bibliográfica

<b>AUTORES</b>	<b>ANO</b>	<b>REVISTA</b>	<b>PAÍS</b>
Carraretto et al.	2004	Energy	Itália
Plakhotnik et al.	2005	Transportation Research Part D	Ucrânia
Mazzoleni et al.	2007	Science of Total Environment	E.U.A.
Lapuerta et al.	2007	Progress in Energy and Combustion Science	Espanha
Papagiannakis et al.	2009	Fuel	Grécia
Xue et al.	2010	Renewable and Sustainable Energy Reviews	E.U.A., China
Poompipatpong e Cheenkachorn	2011	Energy	Tailândia
Macor et al.	2011	Applied Energy	Itália
Abdelaal e Hegab	2012	Energy Conversion and Management	Egito
Park et al.	2012	Science of the Total Environment	Coreia do Sul
Cheenkachorn et al.	2013	Energy	Tailândia
Johnson et al.	2013	Atmospheric Environment	Austrália
Ésteres e Marinov	2014	Transportation Research Part D	Reino Unido
Gangwar e Sharma	2014	Transportation Research Part D	Índia

Fonte: Autor (2016).



Com base na revisão da literatura, pode-se verificar que não há artigo propondo um procedimento de avaliação da eco-eficiência de uma ferrovia tendo em vista a utilização de combustíveis alternativos, o seus custos, emissões e impactos de manutenção. Portanto, a metodologia é apresentada no próximo capítulo.

### 3 METODOLOGIA

A seguir, a metodologia da pesquisa e suas etapas são abordadas. Uma breve descrição da Estrada de Ferro Vitória à Minas, suas características e seu modo de operação são apresentados, assim como cenários de testes propostos com combustíveis alternativos e seu histórico.

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia de pesquisa adotada para o trabalho pode ser classificada como uma pesquisa científica de natureza aplicada, por meio de abordagens qualitativas e quantitativas e com objetivos exploratórios. Além disso, utiliza-se o estudo de caso e a pesquisa bibliográfica como procedimento técnico (VERGARA, 2005).

A pesquisa é classificada como de natureza aplicada, pois consegue gerar conhecimentos voltados para a aplicação prática dos problemas de impactos ambientais de empresas pertencentes a diferentes setores da economia, e ainda é dirigida à solução de problemas específicos. No que diz respeito à abordagem, pode-se considerar que possui enfoque quantitativo, na qual as informações são transformadas em números permitindo análises e comparações, e também enfoque qualitativo, pois se utiliza da indução nas análises dos resultados dos cenários propostos (VERGARA, 2005).

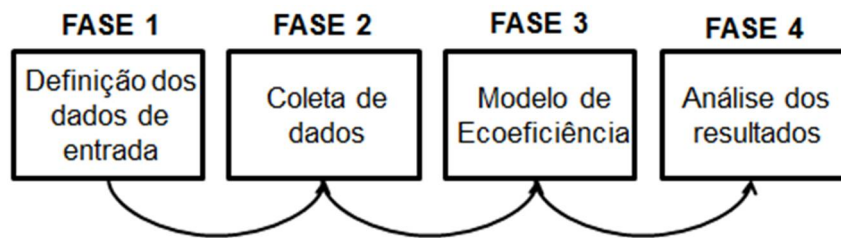
No que diz respeito aos objetivos, a pesquisa é considerada como exploratória, visto que busca tornar o problema explícito por meio da adoção da metodologia da eco-eficiência. Além disso, envolve o levantamento bibliográfico, testes realizados na ferrovia estudada e análise dos estudos de casos encontrados (VERGARA, 2005).

O procedimento técnico adotado é o estudo de caso, visto que engloba o estudo de apenas uma ferrovia e permite o conhecimento aprofundado do problema em questão. Por fim, a pesquisa bibliográfica foi feita em materiais já publicados em artigos científicos, cartilhas e manuais de órgãos nacionais e internacionais (VERGARA, 2005).

### 3.2 ETAPAS DA METODOLOGIA DE PESQUISA

Com o intuito de atingir o objetivo da pesquisa, faz-se necessário seguir uma metodologia de pesquisa com as fases bem definidas. Dessa forma, a metodologia está dividida em quatro fases, Figura 5, com um total de 10 etapas que são apresentadas a seguir.

Figura 5 - Fases da metodologia da pesquisa.



Fonte: Autor (2016).

#### FASE 1: Definição dos dados de entrada

- 1) Definição de quais são os indicadores importantes para coleta, a partir do modelo de gerenciamento ferroviário atual;
- 2) Levantamento da frota de locomotivas utilizada, seus fatores de consumo e emissão;
- 3) Levantamento dos combustíveis e tecnologias a serem comparadas;

#### FASE 2: Coleta de dados

- 4) Definição de quais as emissões monitoradas no estudo;
- 5) Pesquisa sobre a utilização dos combustíveis selecionados na literatura, criando-se assim referências para o estudo;
- 6) Tratamento de dados para serem inseridos nas planilhas;

#### FASE 3: Modelo de eco-eficiência

- 7) Desenvolvimento de planilhas responsáveis pelos cálculos das emissões dos gases poluentes;
- 8) Inserção dos dados tratados nas planilhas;
- 9) Acerto de possíveis erros e novo cálculo dos resultados caso necessário;

#### FASE 4: Análise dos resultados

- 10) Análise quantitativa e qualitativa dos resultados para cada um dos cenários;

### 3.3 UNIDADE DE ANÁLISE PARA ESTUDO DE CASO

A Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) é uma das mais importantes ferrovias do país. Por ela são transportados mais de 120 milhões de toneladas por ano por 905 quilômetros de trilhos. Conta com uma frota de 322 locomotivas e 19.154 vagões que diariamente formam 30 trens de alta carga por eixo, tracionados por até três locomotivas e 252 vagões de minério pesando 110 toneladas cada um. Suas linhas cruzam dois estados: Minas Gerais e Espírito Santo, sendo que um ciclo completo de viagem (porto-mina-porto) leva em torno de três dias a depender da mina de destino. A ferrovia alcança 18 minas no estado de MG, e seu traçado pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Estrada de Ferro Vitória a Minas.



Fonte: Vale (2015).

Atualmente, toda a frota de locomotivas utiliza o óleo diesel brasileiro padrão como combustível. O Governo aumentou o percentual de biodiesel misturado ao diesel de 5% (B5) para 6% (B6) em Julho de 2014 e para 7% (B7) em Novembro de 2014 (DOU, 2014). Como os testes de campo foram realizados quando ainda vigorava a mistura do B5 como padrão, os resultados comparativos são realizados com este referencial.

No que se refere aos combustíveis, foram considerados o uso do óleo diesel com 5% de biodiesel (B5), biodiesel (B25), gás natural em associação com diesel e também gás natural misturado com B25. Todos os dados referentes aos níveis de emissões de poluentes foram obtidos por meio de testes com locomotivas, seguindo as especificações da *United States*

*Environmental Protection Agency* (EPA), agência americana responsável pela regulação de padrões de emissões nas ferrovias dos Estados Unidos da América.

Uma locomotiva típica da EFVM, modelo BB40, utilizada nos testes com B25 e GNL pode ser vista na Figura 7. Este modelo possui potência de 4.000 HP, gerando energia de até 3.100 kWh, sendo capaz de tracionar 84 vagões de minério com 110 toneladas cada ao longo das linhas da ferrovia.

Figura 7 – Locomotiva BB40, utilizada nos testes.



Fonte: Vale (2015).

É importante citar que a ferrovia desenvolveu testes de combustíveis alternativos entre os anos de 2008 e 2015, sendo testados o biodiesel e o gás natural liquefeito (GNL) como alternativas ao óleo diesel padrão.

O projeto Biodiesel da EFVM consistiu na utilização de biodiesel B25, ou seja, 25% de biodiesel e 75% de diesel comum em parte da frota da EFVM, tendo sido desenvolvido entre os anos de 2008 e 2014. A maior parte do biodiesel produzido no Brasil é feito a partir da soja. No início de 2014, o óleo de soja era responsável por mais de 70% da produção de biodiesel no país (ANP, 2014). O biodiesel utilizado pela ferrovia para a fase de testes foi

adquirido na sua forma pura, ou seja, 100% biodiesel (B100) e posteriormente misturado com o B5 pré-existente até ser alcançada uma mistura de 25% de biodiesel e 75% de diesel de petróleo, denominada B25.

Durante os testes na EFVM, as locomotivas consumiram B5, o que significa uma mistura de 5% biodiesel e 95% óleo diesel. Como citado, a partir de novembro de 2014 a legislação brasileira para combustíveis de veículos tradicionais e fora-de-estrada foi alterada, implicando no aumento do percentual de biodiesel de 5% para 7%. Porém, esta alteração ocorreu após os testes na ferrovia, logo, todas as comparações entre os diferentes combustíveis neste trabalho utilizam o B5 como referência. O combustível foi testado em sete locomotivas, sendo que cinco delas utilizaram a mistura B25 e outras duas o B5.

Inspeções semestrais foram realizadas para acompanhar o desgaste em componentes críticos das locomotivas, selecionados em conjunto com o fabricante. Os componentes testados foram: conjunto de força; bomba injetora de combustível; bico injetor; mangueiras de combustível; casquilhos do motor; vareta de acionamento das válvulas e bombas injetoras; sensor de pressão de combustível; válvula reguladora da pressão do combustível; válvula limitadora de pressão do combustível; bomba de transferência de combustível e junta do visor do tanque de combustível.

Foram também realizadas videoscopias, análise de combustíveis, óleo lubrificante, testes de consumo e emissão, os quais também fizeram parte do processo de acompanhamento de desempenho – todos eles acompanhados pelo fabricante, de acordo com protocolo redigido em comum acordo entre as partes. As locomotivas que utilizaram o combustível B5 serviram de referência de desempenho para base de comparação com os resultados obtidos utilizando-se o B25.

Após a coleta e análise dos resultados do teste, pôde-se concluir que não há necessidade de mudanças significativas no projeto original para se utilizar o B25 como combustível. Todavia, alguns planos de manutenção precisam ser realizados com maior frequência, e componentes como vedações, mangueiras e *o-rings*, por serem mais suscetíveis a desgaste provocado pelo

biodiesel, precisam ser substituídos por outros de materiais diferentes. Como o poder calorífico do biodiesel é inferior ao do diesel de petróleo, um aumento de consumo da ordem de 2,5% foi observado durante a operação das locomotivas. De maneira geral, a operação com o B25 seguiu os mesmos padrões da operação com óleo diesel comum, não havendo diferenças de condução do trem por parte dos maquinistas.

O GNL também foi um dos combustíveis alternativos testados na ferrovia, tendo sido iniciado em 2008 e concluído em 2015. O Projeto Gás Natural na EFVM consistiu na avaliação técnico-econômica da utilização de gás natural juntamente com diesel em locomotivas, considerando impactos na potência, no consumo, na emissão de poluentes e na vida útil desses ativos.

Para que se possa utilizar o GNL como combustível, as locomotivas precisam ter seus motores diesel convertidos para a utilização de gás natural, por meio de kits de conversão chamados *dual-fuel*. Estes kits permitem a operação do motor com uma mistura de gás natural e diesel, sem perda de potência, diferentemente do que ocorre com os veículos de passeio tradicionais. Isto se deve ao fato de que durante a operação sempre há uma parcela de diesel misturada com o gás no motor, para que ocorra a ignição da porção de gás, uma vez que a taxa de compressão do motor não é suficiente para causar a autocombustão do gás. Como não há vela de ignição no motor, uma vez que o diesel está em chamas este causa a ignição do gás, obtendo-se assim a potência total do motor com uma parcela menor de diesel do que a original. A proporção da mistura diesel-gás é feita por sistema computadorizado embarcado no kit, de forma a manter sempre a potência nominal de saída do motor – a mistura de gás varia de 30% a 80% e depende de condições monitoradas, como potência requerida para tração, temperatura e pressão do gás, entre outros.

É necessário que um vagão tanque para transporte do gás natural em seu estado liquefeito (GNL) seja acoplado às locomotivas de modo a fornecer o gás para as mesmas. Dentro do tanque do vagão o produto se encontra na fase líquida e é vaporizado por trocadores de calor presentes no vagão antes de alcançar as locomotivas. Já na locomotiva, o gás tem sua temperatura e pressão medidas e reguladas antes que possa ser admitido no motor, misturando-se com o B5 em uma proporção de até 80% de GNL e 20% de B5.

As mesmas locomotivas que utilizaram o B5 associado ao GNL também serviram de comparação para o consumo do B5 isolado. Isto contribui para a diminuição da incerteza dos resultados do teste, uma vez que elimina fatores como variação de consumo entre locomotivas em função de pequenas diferenças de regulagem do motor, por exemplo.

Mais de 50 viagens regulares com as locomotivas modificadas tracionando trens de minério de ferro padrão foram realizadas e monitoradas, somando mais de 100.000km rodados e 1.700 horas de operação, por meio das quais, dados de operação foram coletados.

Também foram realizados testes durante os quais foram coletados dados de consumo, potência, corrente, tensão, temperatura do ambiente e do líquido de arrefecimento, pressão do óleo diesel, entre outros. As medições de potência comprovaram não haver alterações significativas entre a operação em modo diesel e modo *dual-fuel*.

Na Tabela 5 pode ser visto um resumo das principais vantagens de cada modelo de kit:

Tabela 5: Comparativo de características dos modelos de kits testados

	FUMIGATION	PORT-INJECTION
FACILIDADE DE INSTALAÇÃO	X	
SEGURANÇA DE OPERAÇÃO		X
ECONOMIA DE GÁS NATURAL		X
EMIÇÃO DE POLUENTES		X
MANUTENÇÃO	X	
CUSTO DE AQUISIÇÃO	X	

Fonte: Autor (2014).

Como citado anteriormente, são necessários vagões tanque carregados com GNL acoplados às locomotivas que servem como “tanques” de combustível. A ferrovia possui dois vagões concebidos para esse fim e são denominados TGE (números 296.701-4 e 296.700-6), Figura



8. Os vagões TGE tem capacidade de armazenagem de 38 m<sup>3</sup> de GNL, o que equivale a 18.000 litros de diesel. Uma vez liquefeito, o gás ocupa um volume 580 vezes menor que quando vaporizado.

Figura 8: Visão do vagão de GNL (TGE)



Fonte: Vale (2010).

Os vagões TGE são projetados para alimentar duas locomotivas simultaneamente durante as viagens, operando tanto entre as locomotivas da cabeça do trem quanto atrás de ambas, conforme demonstrado pela Figura 9:

Figura 9: Formações possíveis entre as locomotivas e vagão de GNL



Fonte: Vale (2015).

### 3.4 CENÁRIOS PROPOSTOS

Tendo em vista as diversas opções de combustíveis apresentadas no capítulo anterior, optou-se pela criação de cenários de forma a avaliar os impactos gerados pelo transporte ferroviário na EFVM. Os cenários propostos podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 - Resumo dos cenários

<b>Cenário</b>	<b>Descrição</b>
Cenário 1	Todas as locomotivas utilizam o B5 (operação atual)
Cenário 2	Todas as locomotivas GE BB40 utilizam GNL e B5, as demais B5
Cenário 3	Todas as locomotivas GE BB40 utilizam GNL e B5, as demais B25
Cenário 4	Todas as locomotivas GE BB40 utilizam GNL e B25, as demais B25
Cenário 5	Todas as locomotivas utilizam B25

Fonte: Autor (2016).

O primeiro cenário retrata a realidade da operação ferroviária atual na EFVM. Os demais cenários foram avaliados com base na utilização de combustíveis alternativos, em diversas proporções e misturas, dessa forma podendo-se avaliar o impacto ambiental dessas mudanças. O Cenário 2 foi proposto visando estudar o efeito isolado da utilização do GNL nas locomotivas BB40, modelo responsável pelo transporte de minério de ferro na ferrovia e portanto o que possui maior circulação. Dessa forma, seriam feitos investimentos para conversão dos motores para *dual-fuel* apenas nas locomotivas de maior rodagem, evitando-se assim dispêndio de capital significativo em locomotivas de manobra ou baixa circulação, antecipando-se assim o tempo do retorno do investimento. O Cenário 3 combina o efeito do Cenário 2 com a utilização de B25 nas demais locomotivas, de menor rodagem. Como para rodar com B25 as modificações nas locomotivas são pequenas, assim como o dispêndio de capital, esta configuração não altera de forma significativa o prazo para retorno do investimento. O Cenário 4 utiliza a maior concentração de B25 e GNL associados, visando dessa forma maximizar a utilização de combustíveis alternativos, sem, entretanto, majorar demasiadamente os investimentos necessários. Já o Cenário 5 considera a utilização isolada de B25 em todos os modelos de locomotiva, incluindo as que circulam em linha tronco e exclusivas de manobra. Por ter tido sua viabilidade técnica comprovada, a mistura de B25 foi adotada nos Cenários propostos deste trabalho, uma vez que misturas com teor de biodiesel superior não foram testadas e poderiam comprometer o funcionamento dos motores ou implicar em custos adicionais não contabilizados.

## 4 MÉTODO PROPOSTO PARA CÁLCULO DA ECO-EFICIÊNCIA DE LOCOMOTIVAS

Como visto na revisão bibliográfica, não foram encontrados artigos que propusessem um procedimento de avaliação da eco-eficiência de locomotivas tendo em vista a utilização de combustíveis alternativos, o seus custos, emissões e impactos de manutenção. Esta dissertação trata de problemas de eco-eficiência, tendo como foco os índices de emissão de gases poluentes, visando quantificar o impacto gerado pela ferrovia estudada para o meio ambiente, propondo alternativas para operação e quantificando seus custos.

### 4.1 MÉTODO DE CÁLCULO DOS INDICADORES

Com base na fórmula para calcular a eco-eficiência proposta pelo WBCSD, Equação (1), esta dissertação propõe um método de cálculo da eco-eficiência adaptado para locomotivas. Para o cálculo da Equação 1 é necessário definir o valor de serviço (V) e os valores das medidas de eco-eficiência (ME).

Assim, para o valor de serviço (V) foi escolhido um indicador mundialmente utilizado por operadores de ferrovia denominado Toneladas por Quilômetro Bruto (TKB). Ele representa a soma de peso no trem (carga útil somada ao peso dos vagões e locomotivas) multiplicada pela distância transportada.

Para que o TKB seja obtido, primeiramente é necessário definir: 1) o número de vagões ( $W$ ) e 2) o número de viagens por ano de cada vagão ( $T$ ). Com base nestas duas informações, pode-se definir que TKB são as toneladas brutas transportadas,  $T_{wt}$  são as toneladas brutas (peso morto somado do peso da carga) de cada vagão  $w \in W$  em cada viagem  $t \in T$  (toneladas) e  $K_{wt}$  é o total de quilômetros percorrido por cada vagão  $w \in W$  durante a viagem  $t \in T$  (km). Após esta definição, o valor de serviço TKB é obtido pela Equação (6).

$$TKB = \sum_{w \in W} \sum_{t \in T} TB_{wt} K_{wt} \quad (2)$$

Foram definidas sete medidas de eco-eficiência (EM), que são: 1) o consumo total de energia, 2) O consumo total de energia renovável, 3) as emissões de dióxido de carbono, 4) emissões de monóxido de carbono, 5) emissões de óxidos de nitrogênio, 6) emissões de material particulado e 7) custo total (investimento, manutenção e combustíveis). Para o cálculo destas sete medidas, deve-se calcular primeiramente os sete indicadores de influência ambiental (EI).

Para os sete indicadores de influência ambiental propostos que são apresentados a seguir, têm-se os seguintes conjuntos: 1) F representa a combinação de combustíveis que pode ser utilizado pelas locomotivas e 2) L é a combinação de locomotivas.

#### 4.1.1 Consumo de energia total (eiE)

Para o cálculo da influência ambiental consumo de energia total (eiE); têm-se que levantar os seguintes valores:  $FE_{fl}$  que representa o consumo de combustível  $f \in F$  pela locomotiva  $l \in L$  (l/h);  $WH_{fl}$  que são as horas trabalhadas da locomotiva  $l \in L$  utilizando o combustível  $f \in F$  (h) e  $CC_f$  que é o poder calorífico do combustível  $f \in F$  (MJ/l). Logo, o consumo total de energia pode ser obtido pela Equação (7).

$$eiE = \sum_{f \in F} CC_f \left( \sum_{l \in L} FE_{fl} WH_{fl} \right) \quad (3)$$

#### 4.1.2 Consumo Total de Energia Renovável (eiRE)

Outro indicador de influência ambiental, Consumo Total de Energia Renovável (eiRE) é determinado utilizando-se uma equação similar a Equação (3), porém leva em consideração apenas locomotivas utilizando combustível renovável, como por exemplo o biodiesel. Para este indicador, tem-se que: 1)  $F^r$  é a conjunto de combustíveis alternativos usado pelas locomotivas,  $F^r \subseteq F$  and 2)  $L^r$  é a combinação de locomotivas que pode utilizar combustíveis renováveis,  $L^r \subseteq L$ . O consumo total de energia renovável pode ser obtido por meio da Equação (8).

$$eiRE = \sum_{f \in F^r} CC_f \left( \sum_{l \in L^r} FE_{fl} WH_{fl} \right) \quad (4)$$

#### 4.1.3 Emissão total de dióxido de carbono (eiCO<sub>2</sub>)

O indicador emissão total de dióxido de carbono (eiCO<sub>2</sub>) representa o total de emissões de dióxido de carbono em quilos (kg) na atmosfera; e para ele tem-se que: 1) FE<sub>fl</sub> representa o consumo de combustível f ∈ F pela locomotiva l ∈ L (l/h); 2) WH<sub>fl</sub> são as horas trabalhadas da locomotiva l ∈ L utilizando o combustível f ∈ F (h) e 3) EF<sub>f</sub> é o fator de emissão de CO<sub>2</sub> do combustível f ∈ F (kgCO<sub>2</sub>/l ou kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>). Assim, a emissão total de dióxido de carbono é calculada por meio da Equação (9).

$$eiCO_2 = \sum_{f \in F} EF_f \left( \sum_{l \in L} FE_{fl} WH_{fl} \right) \quad (5)$$

#### 4.1.4 Emissões de Monóxido de Carbono (eiCO), Óxido de Nitrogênio (eiNO<sub>x</sub>) e Material Particulado (eiPM)

Os indicadores emissões de Monóxido de Carbono (eiCO), Óxido de Nitrogênio (eiNO<sub>x</sub>) e Material Particulado (eiPM) são medidos em gramas por litro ou gramas por metros cúbicos para GNL. As Equações (10), (11) e (12), similares à Equação (5), são usadas para cálculo dos três indicadores de influência ambiental, diferindo umas das outras pelo fator de emissão de cada poluente, respectivamente EO<sub>f</sub>, EN<sub>f</sub> e EP<sub>f</sub>.

$$eiCO = \sum_{f \in F} EO_f \left( \sum_{l \in L} FE_{fl} WH_{fl} \right) \quad (6)$$

$$eiNO_x = \sum_{f \in F} EN_f \left( \sum_{l \in L} FE_{fl} WH_{fl} \right) \quad (7)$$

$$eiPM = \sum_{f \in F} EP_f \left( \sum_{l \in L} FE_{fl} WH_{fl} \right) \quad (8)$$

#### 4.1.5 Eficiência dos Custos (eiCE)

O último indicador é a Eficiência dos Custos (eiCE). Ele representa o custo total necessário para operar com determinado combustível, sendo calculado como a soma do custo do combustível, da manutenção e do investimento. A seguir, é mostrado como estes três custos são considerados.

O custo do combustível (FC) representa o custo total (US\$) de aquisição do combustível consumido pelas locomotivas da ferrovia. É calculado por meio da Equação (13) onde  $FE_{fl}$  representa o consumo do combustível  $f \in F$  pela locomotiva  $l \in L$  (l/h);  $WH_{fl}$  são as horas trabalhadas da locomotiva  $l \in L$  utilizando o combustível  $f \in F$  (h) e  $FU_f$  representa o custo do combustível  $f \in F$  (US\$ / l ou US\$ / m3).

$$FC = \sum_{f \in F} FU_f \left( \sum_{l \in L} FE_{fl} WH_{fl} \right) \quad (9)$$

Quando se opera com um combustível alternativo, pode ser necessária uma manutenção adicional para reparo dos kits bicomcombustível instalados nos motores diesel das locomotivas que operam com GNL. O biodiesel também exige manutenção adicional durante a operação. O custo da manutenção adicional (MC) é determinado por meio da Equação (14) onde;  $WH_{fl}$  são as horas trabalhadas da locomotiva  $l \in L$  utilizando o combustível  $f \in F$  (h) e  $MU_f$  é o custo adicional de manutenção por hora trabalhada quando se utiliza o combustível  $f \in F$  (US\$/h).

$$MC = \sum_{f \in F} MU_f \left( \sum_{l \in L} WH_{fl} \right) \quad (10)$$

Alguns investimentos são necessários para se operar com gás natural. Portanto, o gasto de capital (CAPEX) para a instalação dos kits bicombustíveis nas locomotivas precisa ser levado em consideração. Não é necessário CAPEX para a operação com B25. O custo de investimento (IC) é calculado pela Equação (15), onde  $IU_f$  representa o investimento total quando se utiliza o combustível  $f \in F$  (US\$).

$$IC = \sum_{f \in F} IU_f \quad (11)$$

Após a determinação de todos os custos pelas Equações (13), (14) e (15), o indicador de eficiência de custos (US\$)  $eiCE$  pode ser calculado. Para o seu cálculo, tem-se: FC é o custo do combustível; MC que é o custo de manutenção e IC que é o custo de investimento. Isto leva à Equação (16), pela qual a eficiência de custos  $eiCE$  (outra influência ambiental) em US\$ pode ser determinada.

$$eiCE = FC + MC + IC \quad (12)$$

#### 4.1.6 Medidas de Eco-eficiência

Uma vez obtidos todos os indicadores de influência ambiental, é possível calcular as sete Medidas de Eco-eficiência relacionadas nas Equações 17 a 23 que são: 1) consumo de energia total (E), 2) consumo total de energia renovável (RE), 3) emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), 4) emissões de monóxido de carbono (CO), 5) emissões de óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), 6) emissões de material particulado (PM) e 7) eficiência de custos (investimento, manutenção e combustíveis) (EC).

$$E = TKB / eiE \quad (13)$$

$$RE = TKB / eiRE \quad (14)$$

$$CO_2 = TKB / eiCO_2 \quad (15)$$

$$CO = TKB / eiCO \quad (16)$$

$$\text{NO}_x = \text{TKB} / \text{eiNO}_x \quad (17)$$

$$\text{PM} = \text{TKB} / \text{eiPM} \quad (18)$$

$$\text{CE} = \text{TKB} / \text{eiCE} \quad (19)$$

Para todos os indicadores, valores maiores indicam melhores resultados, uma vez que para o mesmo valor de serviço (TKB) a ferrovia utiliza de forma mais eficiente a fonte de energia, emite menos poluentes ou dispense menos recursos financeiros para fazer a mudança para um combustível mais limpo.

Portanto, a Tabela 7 evidencia as medidas de eco-eficiência e seus objetivos, além de relacionar as equações para determinação de cada uma.

Tabela 7 – Medidas de eco-eficiência, objetivos e equações propostas

Medida de Eco-eficiência (EM)	Objetivo	Equação
1 Eficiência energética	Avaliar o consumo de combustível	(13)
2 Eficiência energética renovável	Avaliar a utilização de energia renovável	(14)
3 Eficiência na emissão de CO <sub>2</sub>	Avaliar a emissão de CO <sub>2</sub>	(15)
4 Eficiência na emissão de CO	Avaliar a emissão de CO	(16)
5 Eficiência na emissão de MP	Avaliar a emissão de MP	(17)
6 Eficiência na emissão de NO <sub>x</sub>	Avaliar a emissão de NO <sub>x</sub>	(18)
7 Eficiência de custos	Avaliar o custo da utilização de diferentes combustíveis	(19)

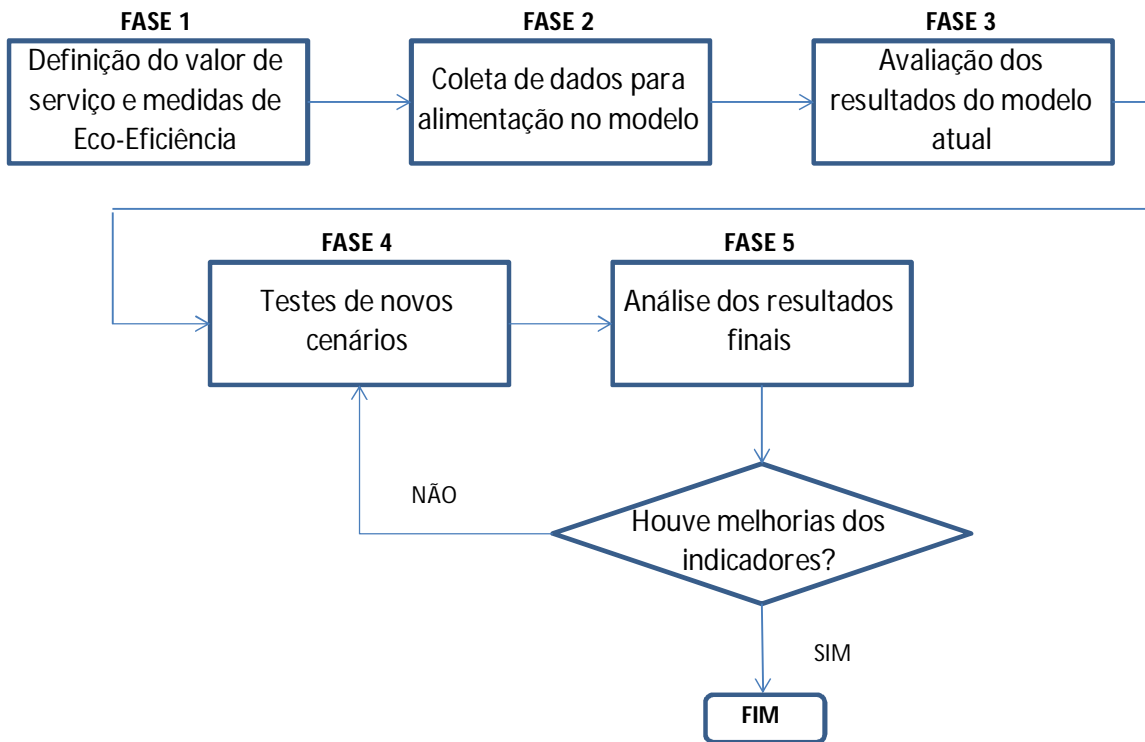
Fonte: Autor (2016).

#### 4.1.7 Procedimento Para a Avaliação da Eco-Eficiência

Visando facilitar a adoção do método proposto por empresas, ferrovias ou agências reguladoras, foi elaborado um procedimento para avaliação da Eco-Eficiência, incluindo um fluxograma dividido em cinco fases, Figura 10, com um total de 14 etapas que são apresentadas a seguir.



Figura 10 - Fases do procedimento para avaliação da Eco-Eficiência.



Fonte: Autor (2016).

#### FASE 1: Definição do valor de serviço e medidas de Eco-Eficiência

- 1) Definição do valor de serviço e indicadores de influência ambiental;
- 2) Obtenção das medidas de Eco-Eficiência;

#### FASE 2: Coleta de dados para alimentação no modelo

- 3) Levantamento dos combustíveis e tecnologias a serem comparadas;
- 4) Levantamento da frota de locomotivas utilizada, seus fatores de consumo e emissão;
- 5) Revisão bibliográfica;
- 6) Tratamento de dados para inserção dos mesmos nas planilhas;

#### FASE 3: Avaliação dos resultados do modelo atual

- 7) Desenvolvimento de planilhas responsáveis pelos cálculos das medidas de Eco-Eficiência;
- 8) Inserção dos dados tratados nas planilhas;

- 9) Obtenção e análise das medidas de Eco-Eficiência do modo atual de operação da ferrovia;

#### FASE 4: Testes de novos cenários

- 10) Criação de cenários de operação diferenciados com a utilização de combustíveis alternativos;
- 11) Utilização das fórmulas expostas neste capítulo para efeito de comparação dos novos cenários com o atual;
- 12) Processamento dos dados e obtenção dos resultados para cada cenário adicional criado;

#### FASE 5: Análise dos resultados finais

- 13) Avaliação e comparação dos resultados dos cenários criados em vista do cenário de operação atual.
- 14) Avaliar se houve melhorias em relação ao cenário atual. Caso afirmativo, propor implantação do cenário com os melhores resultados. Caso não tenha ocorrência de nenhum cenário substancialmente melhor que o modo de operação atual, revisar os cenários propostos e reprocessar os dados até que se obtenha cenários com resultados melhores.

Na primeira etapa da primeira fase, a ferrovia ou agência definirá quais serão os indicadores utilizados para Valor de Serviço e Influência Ambiental. Estes irão compor a Equação 1, gerando as Medidas de Eco-Eficiência. Para Valor de Serviço, é recomendado um indicador de ampla utilização, como o TKB, de forma a ser possível comparar os resultados obtidos com outras ferrovias. Para os indicadores de Influência Ambiental, a ferrovia ou agência deve avaliar quais os gases poluentes mais importantes para análise, levando-se em conta a legislação local: se há regulamentação de emissões para gases específicos, estes devem ser incluídos como indicadores. Devem também ser avaliados outros fatores para a escolha, como os interesses particulares da ferrovia, comunidades locais, ou mesmo referências nacionais e internacionais. Na segunda etapa, as Medidas de Eco-Eficiência serão obtidas através das equações criadas a partir da Equação 1.

Na segunda fase, durante a terceira etapa a empresa deve selecionar quais combustíveis alternativos e tecnologias serão consideradas no estudo, além de realizar o levantamento dos dados dos combustíveis novos, assim como do combustível padrão. Dados como poder calorífico, densidade, ponto de ignição, custo de aquisição, entre outros devem ser considerados. Deverá também ser avaliada a facilidade de acesso a novos combustíveis, se o seu custo é superior ou inferior ao do combustível padrão, necessidades de adequação nos motores ou demais partes mecânicas e elétricas das locomotivas, necessidade de instalações adicionais para armazenagem dos novos combustíveis, entre outros. Na quarta etapa, deverá ser realizado o levantamento minucioso de dados da frota de locomotivas, como quantidade e modelo, se houve modificações realizadas em relação ao seu projeto original, consumo de combustível real de cada modelo de locomotiva, *duty cycle* de cada formação de trem e fatores de emissão de poluentes para cada modelo de locomotiva.

Para a obtenção dos dados de consumo de combustível e emissões de poluentes, deverá ser utilizada uma bancada de testes com locomotivas da frota existente, onde os dados reais serão coletados utilização nas planilhas. Em paralelo, recomenda-se que sejam realizados testes com os combustíveis alternativos em parte da frota, de forma assistida, em condução de trens regulares nos mesmos moldes dos trens padrão que circulam nas linhas. Isto visa verificar a funcionalidade dos novos combustíveis, a assimilação das particularidades de operação, se haverá mudança na condução dos trens em função da troca – como perda de potência, mudança de tempo para realização do mesmo percurso quando comparado ao combustível tradicional, entre outros fatores que podem não ter sido levados em consideração anteriormente. A quinta etapa contempla uma pesquisa das emissões de ferrovias semelhantes, no mesmo país e também no cenário internacional. Ferrovias de países como os E.U.A. divulgam suas emissões, facilitando o acesso aos dados para fins de comparação, assim como diversas ferrovias europeias. Na sexta etapa deverá ser realizado o tratamento dos dados para inserção nas planilhas.

A sétima etapa contará com o desenvolvimento de planilhas para automação dos cálculos a partir dos dados de entrada, podendo ser utilizados programas como o Microsoft Excel. Na oitava etapa os dados serão inseridos nas planilhas previamente preparadas. O processamento dos dados será realizado na oitava etapa, de forma a se obter os resultados para cada uma das

Medidas de Eco-Eficiência para o modelo de operação vigente. Na nona etapa, será realizada a análise dos dados obtidos para o modelo atual, podendo ser comparados com resultados obtidos por outras ferrovias da mesma ou de outras empresas, ou mesmo de outros países. Nesta etapa é obtido um “retrato” da forma de operação atual, a ser utilizado como referência pela empresa.

Na décima etapa, deverão ser propostos novos cenários que incluam a utilização de combustíveis e tecnologias alternativas. O *mix* de combustíveis a ser considerado deve levar em conta fatores como: qual o maior *blend* possível de um combustível alternativo que ao mesmo tempo exija menores modificações nos ativos, qual combinação resultará em menores emissões sem necessidade de investimentos vultosos, quais combustíveis associados podem diminuir o custos de operação, ou seja, possuem custo de aquisição menor que o combustível padrão. Também pode ser levada em consideração a mistura de dois combustíveis, sendo um mais caro e outro mais barato que o padrão, desde que resulte em menores emissões ou maior eficiência energética. Na décima primeira etapa os dados levantados para os novos combustíveis deverão ser lançados nas fórmulas propostas neste capítulo para que seja possível a geração de valores na mesma base do cenário padrão da ferrovia. Na décima segunda etapa os cálculos serão realizados a partir das fórmulas nas planilhas, e será avaliado se houve melhoria e, em quais indicadores dos cenários propostos, em relação ao modo padrão de operação da ferrovia.

Na décima terceira e décima quarta etapas serão realizadas as análises dos resultados obtidos para os cenários propostos em comparação ao cenário atual de operação da ferrovia: houve melhoria consistente em diversas Medidas de Eco-Eficiência? Caso negativo deve-se propor novos cenários afim de que o resultado de ao menos alguns deles seja superior ao modelo padrão de operação.

Caso se tenha obtido resultados melhores que o atual de forma consistente, deve-se realizar a normalização dos resultados. Para o método de pontuação da normalização devem ser levados em consideração resultados de cenários propostos que sejam melhores que o cenário atual, assim como limites de emissões adotados como referência, sejam eles baseados em legislação local, internacional, ou mesmo emissões de outras ferrovias. Deve-se atribuir 1 ponto para

cada medida de cada um dos cenários que atender aos requisitos estabelecidos, e 0 ponto caso contrário. Em seguida, devem ser somados todos os pontos obtidos por cada um dos cenários. O cenário que obtiver maior pontuação será considerado como o melhor, o que indicaria um possível cenário a ser adotado pela ferrovia.

É fortemente recomendada a realização de uma análise de sensibilidade para a medida Eficiência de Custos, uma vez que variações significativas no valor de aquisição dos combustíveis alternativos podem inverter os resultados, fazendo com que a troca para um combustível mais limpo não se sustente financeiramente. Para esta análise, deve-se flutuar o preço de todos os combustíveis em uma porcentagem acima e abaixo do valor atual de mercado. A porcentagem para variação deve ser definida pela empresa tendo em vista patamares críveis para flutuação dos preços em um horizonte que abranja todo o tempo necessário para o retorno financeiro da troca de combustíveis, no caso de troca por combustíveis com custo inferior. No caso de substituição para combustíveis com custo mais elevado o mesmo raciocínio é válido, uma vez que os custos futuros podem ser significativamente superiores aos atuais, invalidando a troca. Se, mesmo após a análise de sensibilidade, os resultados indicarem que há cenários propostos com ganhos em relação ao cenário atual, deve-se optar pelo cenário com maior ganho, ou mesmo pelo cenário com ganhos em medidas estratégicas para a empresa, como por exemplo, a emissão de um determinado poluente, ou a redução do custo total de operação.

Uma vez elegido o cenário a ser adotado, devem ser avaliadas as medidas necessárias para sua implantação, como por exemplo, necessidade de adequações nos ativos e parque industrial da empresa, contratação de mão-de-obra, novos procedimentos de manutenção e operação, realização de obras e seu impacto nas comunidades locais, espaço disponível em caso de necessidade de ampliação de infraestrutura, logística necessária para transporte, recebimento e abastecimento com os novos combustíveis, impactos causados em fornecedores ou em comunidades locais em função da redução da aquisição do combustível padrão da ferrovia, uma vez que os novos combustíveis entrem em cena, entre outros.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo os procedimentos para obtenção dos dados de consumo e emissões utilizados no trabalho serão expostos.

### 5.1 CONSUMO

Durante a operação regular das locomotivas foi consumido o diesel B5, portanto, todas as comparações neste trabalho o consideram como combustível de referência.

As locomotivas modelo BB40 possuem um modo de autocarga, em que o gerador principal exerce força contrária à rotação do motor diesel, simulando um carregamento, desta forma eliminando a necessidade de uso de dinamômetro. Logo, o galpão de teste de carga da companhia consiste de uma balança de alta precisão para medição do consumo de combustível. Para as locomotivas de modelos mais antigos, como BB36 e DDM, as quais não apresentam o modo de autocarga, é possível realizar a medição de consumo por meio da dissipação da energia elétrica produzida pelas mesmas em uma grade de resistências presente no galpão. Portanto, os testes foram conduzidos primeiramente para o combustível B5 durante um teste de consumo de 90 minutos para cada modelo de locomotiva, passando por cada ponto de aceleração. Cada ponto de aceleração produz uma determinada potência de saída, sendo que há no total nove pontos, incluindo o ponto morto e oito pontos com geração de potência. O mesmo teste é então repetido mais quatro vezes para cada locomotiva, utilizando o mesmo combustível, completando então sete horas e meia de testes para cada combustível de cada locomotiva.

Uma vez registrados os resultados, as locomotivas são abastecidas com outro combustível (B25 ou GNL) e mais uma vez submetidas ao mesmo procedimento. A Tabela 8 apresenta parte dos resultados obtidos com os testes. A média das cinco medições é considerada como o valor de consumo específico de cada modelo de locomotiva. Três locomotivas foram testadas com B5 e B25, e duas com B5 e GNL no galpão de testes da EFVM.

A Tabela 8 apresenta os resultados para o ponto quatro da locomotiva BB40. A segunda coluna representa as cinco medições realizadas para cada ponto, durante 10 minutos cada uma. As colunas 3 e 4 representam os pesos iniciais e finais em quilos de cada medição e a última coluna representa o consumo de cada ponto, em quilos. Portanto, o resultado final é a média das cinco medições (40,14 kg), com desvio padrão de 0,5 kg.

Tabela 8 – Planilha de teste de consumo (visão parcial – ponto 4)

<b>Ponto</b>	<b>Medição</b>	<b>Peso Inicial (kg)</b>	<b>Peso Final (kg)</b>	<b>Consumo (kg)</b>
	1 (10 min.)	1.200	1.160	40
	2 (10 min.)	733	693	40
4	3 (10 min.)	290	249	41
	4 (10 min.)	1.236	1.196	40
	5 (10 min.)	733,45	693,75	39,7
<b>Média</b>				<b>40,14</b>

Fonte: Vale (2013).

A Tabela 9 mostra o consumo de combustível por hora de cada uma das cinco locomotivas testadas. Os resultados são utilizados como a média de consumo das locomotivas da frota. Como pode ser visto, a locomotiva BB40 consome 272,91 litros por hora usando B5, enquanto a locomotiva BB36 consome 262,87 l/h usando B5 e a DDM 259,82 l/h. A diferença de consumo entre elas pode ser explicada pela diferença de potência produzida. A BB40 possui maior consumo específico, pois é capaz de gerar mais potência de saída, sendo este o modelo mais novo da frota da ferrovia. Utilizando GNL, a BB40 consome 127,23 l/h de B5 e 129,96 l/h de GNL vaporizado simultaneamente. BB40, BB36 e DDM consomem 280,35 l/h, 270,04 l/h e 267,01 l/h, respectivamente, com B25.

Tabela 9 – Consumo de combustível por hora para cada tipo de locomotiva

<b>Consumo de combustível por hora (l/h)</b>			
<b>Combustível / Modelo</b>	<b>Combustível</b>		
	<b>B5</b>	<b>GNL*</b>	<b>B25</b>
B5 / BB40	272,91	-	-
B5 / BB36	262,87	-	-
B5 / DDM	259,92	-	-
LNG / BB40	127,23	129,96	-
B25 / BB40	-	-	280,35
B25 / BB36	-	-	270,04
B25 / DDM	-	-	267,01

\* - metros cúbicos, vaporizado.

Fonte: Vale (2013).

## 5.2 EMISSÕES

Um analisador de emissões, modelo TM-131 do fabricante Tecnomotor (TECNOMOTOR, 2015) foi instalado no duto de exaustão das locomotivas para captura dos gases durante a operação com B5, B25 e GNL. Uma visão parcial dos dados coletados pode ser vista na Tabela 10.



Tabela 10 – Emissões do B5 por locomotivas BB40 (visão parcial)

<b>Emissões do B5 (kg/h)</b>		
<b>PONTO</b>	<b>CO (ppm)</b>	<b>CO2 (%)</b>
8	215	1,1
7	192	1,3
6	98	1,2
5	56	1,5
4	39	1,4
3	27	1,1
2	13	1
1	8	0,8
IDLE	2,3	0,8

Fonte: Autor (2016).

A Tabela 11 mostra os valores de poder calorífico, fatores de emissão e custo de cada combustível. O B25 possui maior fator de emissão de NO<sub>x</sub> do que o GNL ou o B5. Por outro lado, gera menos CO<sub>2</sub>, CO e MP. O GNL emite menos CO<sub>2</sub>, menos de 25% do NO<sub>x</sub> e virtualmente zero MP, mas emite mais CO que B5 ou B125. Cada metro cúbico de GNL possui mais poder calorífico do que um litro de B5 ou B25, o que significa que gera mais energia durante a combustão. Os valores de emissão da Tabela 11 foram obtidos por meio de testes de carga realizados por locomotivas com a mesma característica das que compõe a frota da ferrovia. O poder calorífico foi medido de amostrar usadas durante operação regular, e o custo foi o praticado pela companhia durante os testes.

Tabela 11 – Poder calorífico, fatores de emissão e custos dos combustíveis

	<b>B5</b>	<b>GNL*</b>	<b>B25</b>
Poder calorífico	37.711 kJ/l	40.039 kJ/m <sup>3</sup>	37.065 kJ/l
Fator de emissão do CO <sub>2</sub>	2,70 kg/l	2,03 kg/m <sup>3</sup>	2,65 kg/l
Fator de emissão do NO <sub>x</sub>	44,3 g/l	10,09 g/m <sup>3</sup>	45,23 g/l
Fator de emissão do PM	1,62 g/l	0,14 g/m <sup>3</sup>	1,46 g/l
Fator de emissão do CO	4,5 g/l	5,9 g/m <sup>3</sup>	4,05 g/l
Custo do combustível	1,09 US\$/l	0,69 US\$/m <sup>3</sup>	1,15 US\$/l

\* vaporizado

Fonte: Autor (2016).

Ao se tratar de emissões, é importante que sejam utilizadas referências para servir de base de comparação, e a legislação local deve ser estudada de forma a se obter os valores a serem observados para emissão de cada poluente. Após pesquisa, notou-se não haver padrão de emissão de poluentes estipulado para locomotivas tanto no âmbito federal quanto no estadual no Brasil. Desta maneira, buscaram-se referências internacionais para serem utilizadas neste trabalho e as legislações de maior impacto atualmente no mundo são as norte-americana e europeia.

A *United States Environmental Protection Agency* (EPA) é uma agência do governo norte-americano que define o padrão de emissões para veículos dentro e fora de estrada. Todas as ferrovias americanas devem atender aos padrões impostos pela EPA, tendo os mesmos sido publicados no *US Code of Federal Regulations* (eCFR) - código federal de regulamentos americano - Capítulo 40, Parte 89 (DIESELNET, 2016; ECFR, 2016).

Os padrões da EPA são até certo grau harmonizados com o padrão europeu de emissões para veículos fora de estrada, sendo que o modelo europeu também é dividido em quatro estágios. O Estágio 4 é o mais restritivo e vigora desde 2014. Foi proposto ainda em 2014 o Estágio 5, ainda mais restritivo que o Estágio 4, mas que ainda não entrou em vigor. O padrão europeu é medido em gramas por quilowatt/hora, enquanto o padrão americano é medido em gramas por

HP/hora. Quando trazidos para a mesma unidade, o padrão americano é mais restritivo para todos os poluentes estudados neste trabalho (EPA, 2016; DIESELNET, 2016). Em função de serem mais restritivos que o padrão europeu, e do perfil das ferrovias americanas ser mais focado em transporte de carga que as ferrovias europeias, focadas principalmente no transporte de passageiros, o padrão da EPA foi adotado neste trabalho e pode ser visto na Tabela 12.

A EPA define o padrão de emissão para locomotivas operando em linhas tronco de ferrovias, assim como para máquinas de manobra. As locomotivas da linha tronco percorrem maiores distâncias transportando cargas pesadas, como minério de ferro, enquanto locomotivas de manobra percorrem distâncias significativamente menores.

A EPA define cinco padrões, chamados de TIER. TIER 0 é o padrão que permite maiores emissões e o TIER 4 o mais restritivo, permitindo menos poluição. O governo americano definiu que a partir de janeiro de 2015 todas as locomotivas deveriam atender aos requisitos do padrão de emissões TIER 4 (EPA, 2016). No Capítulo 6, as emissões da ferrovia estudada foram comparadas com os padrões da EPA como forma de referência. A Tabela 12 apresenta os padrões de emissão de cada TIER, partindo de 0 (menos restritivo) até 4 (mais restritivo). A primeira coluna informa que este padrão de emissões é para locomotivas que circulam na linha tronco, ou seja, não são exclusivas de manobra. A segunda coluna referencia os padrões de emissão para cada classe, de zero a quatro. A terceira coluna apresenta as máximas emissões permitidas para cada classe de TIER, em gramas por HP-hora. O mesmo é válido para a quarta e quinta colunas.

Tabela 12 – Padrão de emissão para locomotivas definido pela EPA

Ciclo	TIER	NO <sub>x</sub>	PM	CO
		(g/HP-hr)	(g/HP-hr)	(g/HP-hr)
Linha Tronco	0	9,50	0,22	5,00
	1	7,40	0,22	2,20
	2	5,50	0,10	1,50
	3	5,50	0,10	1,50
	4	1,30	0,03	1,50

Fonte: Adaptado de EPA (2016).

Para que fosse possível comparar o padrão de emissões definido pela EPA com as emissões geradas pela ferrovia, ambas foram trazidas para a mesma base. A Tabela 12 apresenta as emissões por HP bruto por hora. Isso significa que primeiramente foi necessário obter a produção bruta de HP de todas as locomotivas da frota durante um ano inteiro de operação. Uma vez conhecido, este número foi ser multiplicado pelos valores de NO<sub>x</sub>, MP e CO apresentados na Tabela 12, obtendo-se assim as máximas emissões anuais permitidas para a ferrovia, para cada categoria de TIER. Em seguida, as emissões anuais das locomotivas da ferrovia foram comparadas com os limites impostos pelas classes de TIER, podendo-se assim concluir em qual classe a ferrovia se situa. As linhas horizontais de TIER apresentadas nas Figuras 5, 6 e 7, no Capítulo 7, demonstram os limites impostos pelas classes de TIER para cada poluente em questão, servindo como referência.

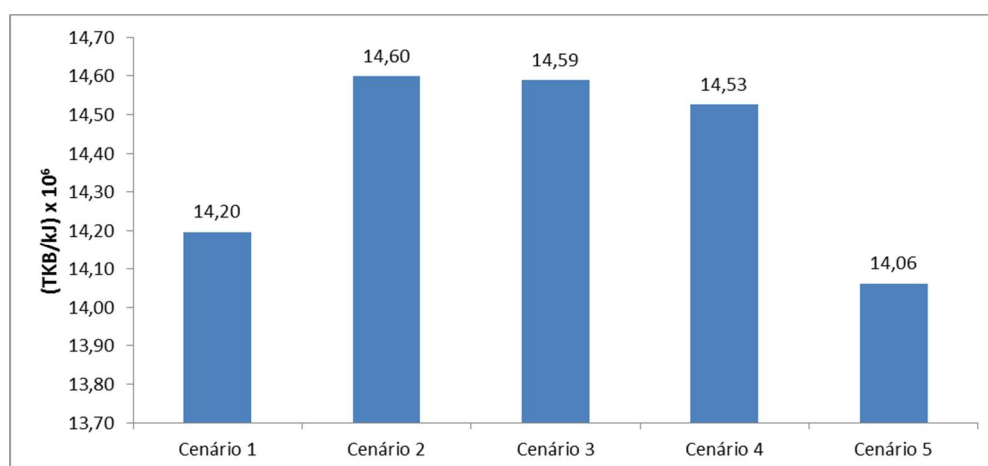
## 6 RESULTADOS E ANÁLISES

Com base no exposto nos Capítulos 4 e 5, pôde-se chegar a aplicação dos resultados do método proposto para avaliação da eco-eficiência de locomotivas. Os cinco cenários apresentados na Tabela 5 foram analisados e a seguir são apresentados os resultados para cada um deles. Assim, foram analisadas as seguintes medidas de eco-eficiência: consumo total de energia, consumo total de energia renovável, emissões de CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> e MP. Para cada uma delas, os dados dos cinco cenários foram comparados de forma a verificar quais os impactos com a troca dos combustíveis.

### 6.1 CONSUMO TOTAL DE ENERGIA (E)

A Figura 11 mostra o resultado do consumo total de energia (E). O Cenário 2 é o mais eficiente em função do uso do GNL, e apresenta uma pequena diferença (0,06%) em relação ao Cenário 3. O Cenário 5 é o menos eficiente por causa do uso de biodiesel, que aumenta o consumo de combustível por ter menor poder calorífico. O Cenário 1 é melhor que o cenário 5 (0,97%) uma vez que menor quantidade de biodiesel é utilizada. O desvio padrão dos resultados é de 0,84%, influenciado pelas medições de consumo realizadas para cada tipo de combustível. Isto significa que tecnicamente os Cenários 2, 3, e 4 estão empatados, não apresentando diferença estatística significativa.

Figura 11 – Consumo Total de Energia (E)

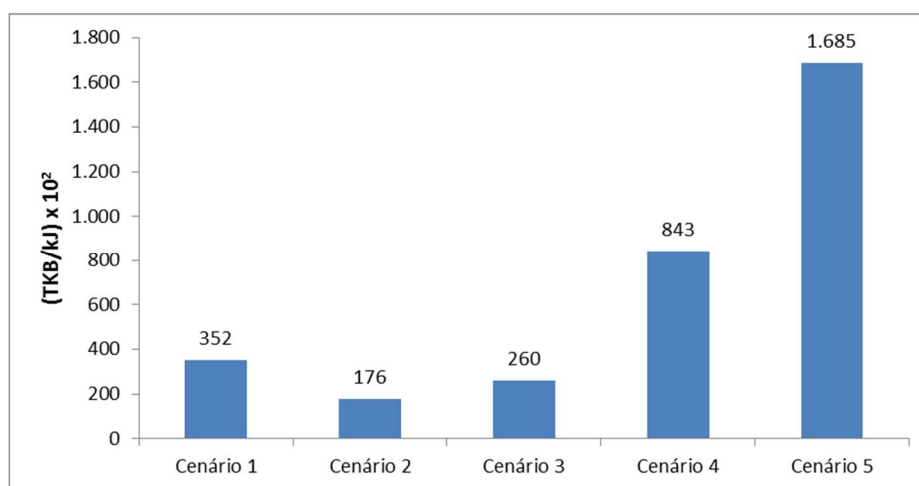


Fonte: Autor (2016).

## 6.2 CONSUMO TOTAL DE ENERGIA RENOVÁVEL (RE)

A Figura 12 apresenta os resultados obtidos para o consumo total de energia renovável de cada cenário. A utilização de combustíveis renováveis leva a um desempenho ambiental melhor e o Cenário 5, que utiliza a maior parcela de biodiesel, apresenta o melhor resultado. O Cenário 4 vem em segundo lugar, apesar de apresentar um resultado muito inferior ao Cenário 5. O Cenário 2 tem o menor uso de energia renovável em função da substituição de B5 por GNL, que por sua vez não é um combustível renovável. O Cenário 3 é melhor que o Cenário 2 por conta do uso de B25 nas locomotivas modelo BB36 e DDM.

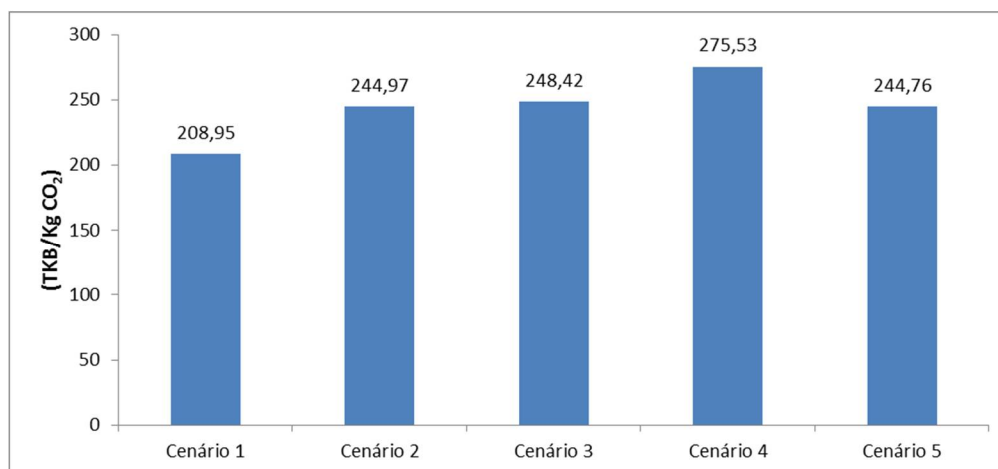
Figura 12 – Consumo Total de Energia Renovável (RE)



Fonte: Autor (2016).

## 6.3 EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>)

A Figura 13 mostra os resultados referentes às emissões de CO<sub>2</sub>. O Cenário 4 apresenta o melhor resultado pois o GNL utilizado nas locomotivas BB40 combinado com o biodiesel fornece a menor emissão de CO<sub>2</sub>. Os Cenários 2 e 5 mostram resultados bastante semelhantes e o Cenário 1 apresenta as maiores emissões. Uma vez que o biodiesel é considerado 100% renovável, as emissões de CO<sub>2</sub> podem ser reportadas separadamente do total de emissões (*GHG Protocol*, 2004). As considerações se referem apenas ao consumo de combustível. Emissões geradas durante o processo de produção e transporte do combustível não foram consideradas.

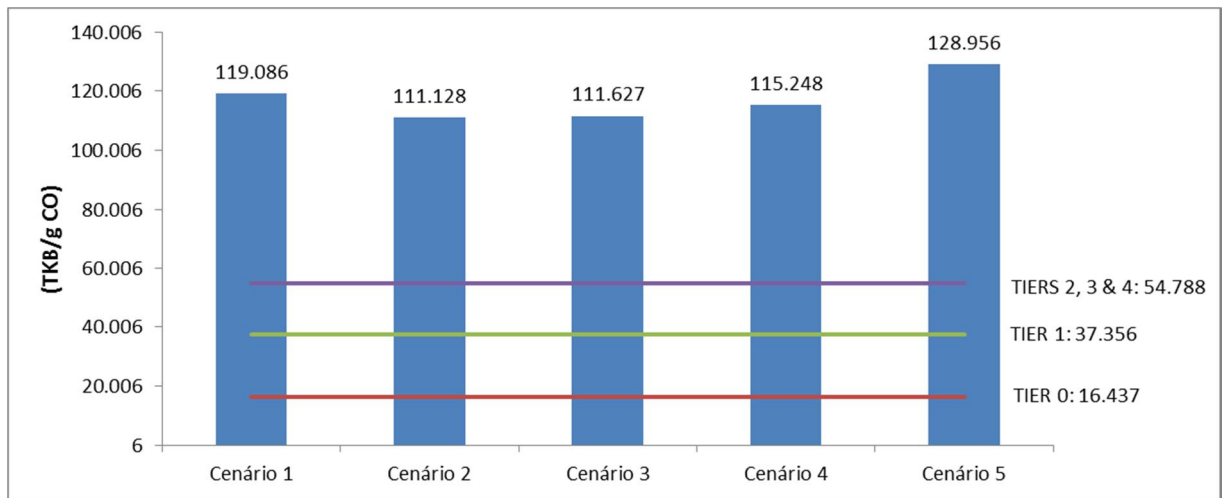
Figura 13 – Emissões de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

Fonte: Autor (2016).

#### 6.4 EMISSÕES DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

Emissões de monóxido de carbono (CO) são apresentadas na Figura 14. O Cenário 5 apresenta o melhor resultado uma vez que as emissões de CO do biodiesel são menores que do B5 ou GNL. Os Cenários 2, 3 e 4 apresentam maiores emissões de CO do que o Cenário 1, uma vez que o GNL emite mais monóxido de carbono que o B5 ou B25. Os Cenários 2 e 3 estão empatados, com diferença (499,00 g) dentro da margem de erro (1.871,14 g). As diferenças dos demais resultados foram todas significativas. A linha horizontal inferior representa as emissões de CO para o TIER 0 [16.436 TKB/CO (g)], a linha horizontal intermediária para o TIER 1 [37.356 TKB/CO (g)] e a linha horizontal superior os TIERS 2, 3 e 4 [54.788 TKB/CO (g)]. Como pode ser visto, todos os cenários alcançam os requisitos para emissões de monóxido de carbono para TIER 4, ou seja, emitem menos CO por TKB do que o limite admitido pelo padrão TIER 4.

Figura 14 – Emissões de Monóxido de Carbono (CO)



Fonte: Autor (2016).

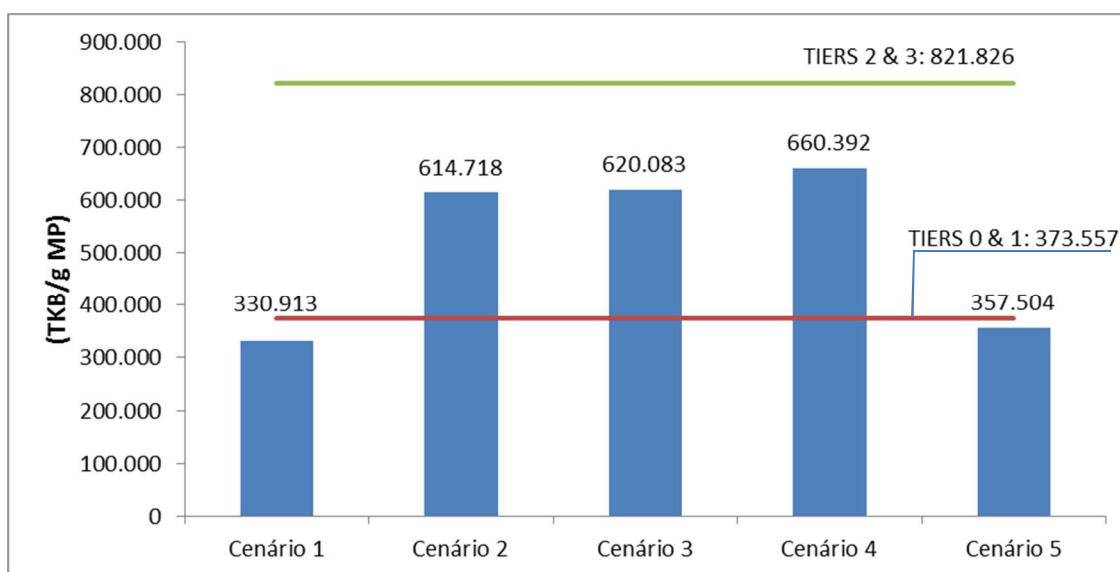
### 6.5 EMISSÕES DE MATERIAL PARTICULADO (MP)

Os resultados de emissão de material particulado (MP) são exibidos na Figura 15. O Cenário 4 apresenta o melhor resultado uma vez que as emissões de MP do GNL e do biodiesel são inferiores às do diesel de petróleo. O Cenário 1 apresenta as maiores emissões de MP, seguido pelo Cenário 5.

A linha horizontal inferior representa o padrão de emissões de MP para o TIER 0 e 1 [373.557 TKB/MP (g)] e a linha horizontal superior representa os TIERs 2 e 3 [821.826 TKB/MP (g)]. O padrão TIER 4 para ser atingido, precisa chegar ao nível de 2.739.421 TKB/MP (g), logo nenhum cenário é capaz de alcançá-lo. Como pode ser visto, os Cenários 2, 3 e 4 atingem as exigências do TIER 1, e os Cenários 1 e 5 não são capazes de alcançar até mesmo os padrões de emissão de MP do TIER 0.



Figura 15 – Emissões de Material Particulado (MP)



Fonte: Autor (2016).

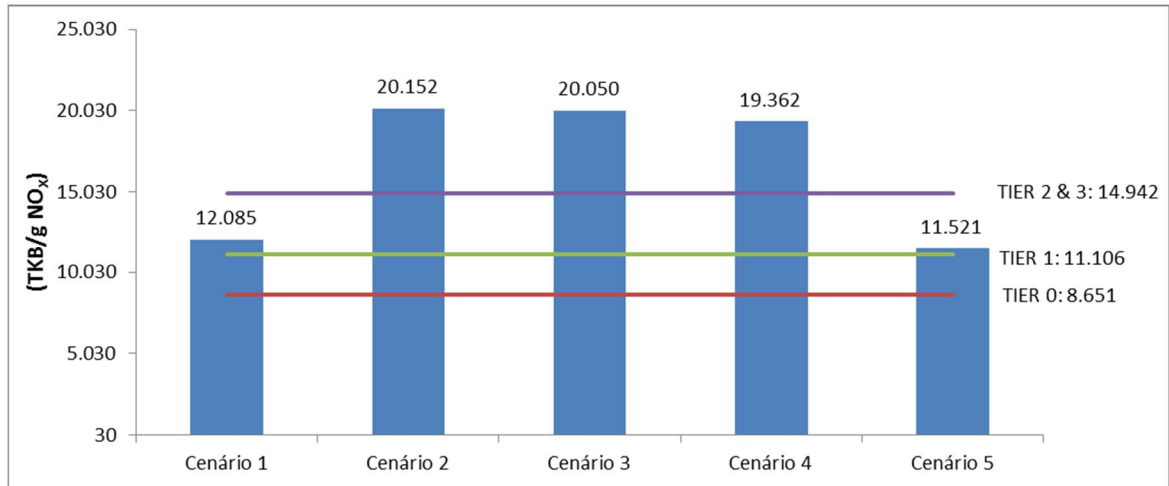
## 6.6 EMISSÕES DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NO<sub>x</sub>)

A Figura 16 apresenta os resultados para emissão de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>). O Cenário 2 apresenta o melhor resultado já que as emissões do GNL são muito inferiores do que as do diesel de petróleo ou biodiesel. Os Cenários 3 e 4 apresentam emissões ligeiramente inferiores que as do Cenário 2 porque o biodiesel emite mais NO<sub>x</sub> que o diesel de petróleo, mas o Cenário 3 apresenta resultado dentro da margem de erro [10.456,33 TKB/NO<sub>x</sub> (g)], logo não há diferença significativa [5.365 TKB/NO<sub>x</sub> (g)] em comparação ao Cenário 2. As diferenças dos demais resultados foram todas significativas. O Cenário 5 apresenta a maior emissão de NO<sub>x</sub>, maior inclusive que as do Cenário 1, causada pelo aumento do consumo de combustível provocado pela utilização de biodiesel nas locomotivas, associado também ao seu maior fator de emissão de NO<sub>x</sub>.

A linha horizontal inferior representa o padrão de emissão de NO<sub>x</sub> para o TIER 0 [8.651 TKB/NO<sub>x</sub> (g)], e a linha intermediária representa o TIER 1 [11.106 TKB/NO<sub>x</sub> (g)]. Os TIERS 2 e 3 [14.942 TKB/NO<sub>x</sub> (g)] são representados pela linha horizontal superior. O padrão TIER 4 pode apenas ser alcançado com emissões de 63.217 TKB/NO<sub>x</sub> (g) e nenhum dos cenários é

capaz de alcançá-lo. Pode ser visto que os Cenários 2, 3 e 4 são capazes de alcançar os requerimentos do TIER 3 e os Cenários 1 e 5 atendem aos padrões do TIER 1 de emissões.

Figura 16 – Emissões de Óxidos de Nitrogênio ( $\text{NO}_x$ )

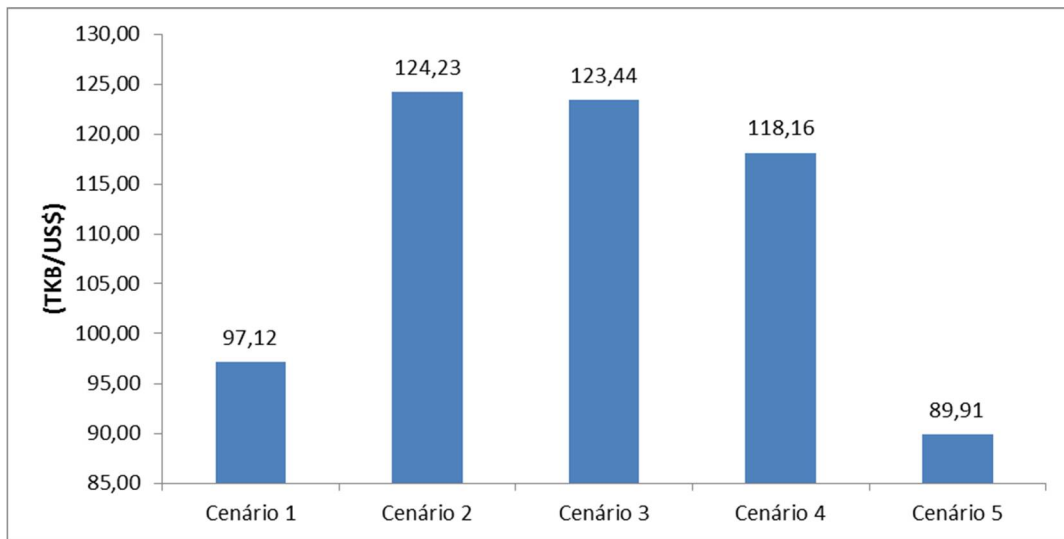


Fonte: Autor (2016).

## 6.7 EFICIÊNCIA DE CUSTO

Os resultados para a Eficiência de Custo são mostrados nas Figura 17 e Figura 18. A Figura 17 considera apenas o custo dos combustíveis. O Cenário 2 é o melhor, uma vez que o GNL é mais barato que o B25 ou o B5 no Brasil, mas fica dentro da margem de erro quando comparado ao Cenário 3. O Cenário 5 apresenta o pior resultado, pois o B25 é mais caro que o B5 e ainda possui poder calorífico inferior, aumentando o consumo específico da locomotiva. O Cenário 1 é melhor que o Cenário 5 porque o B5 tem custo inferior ao B25.

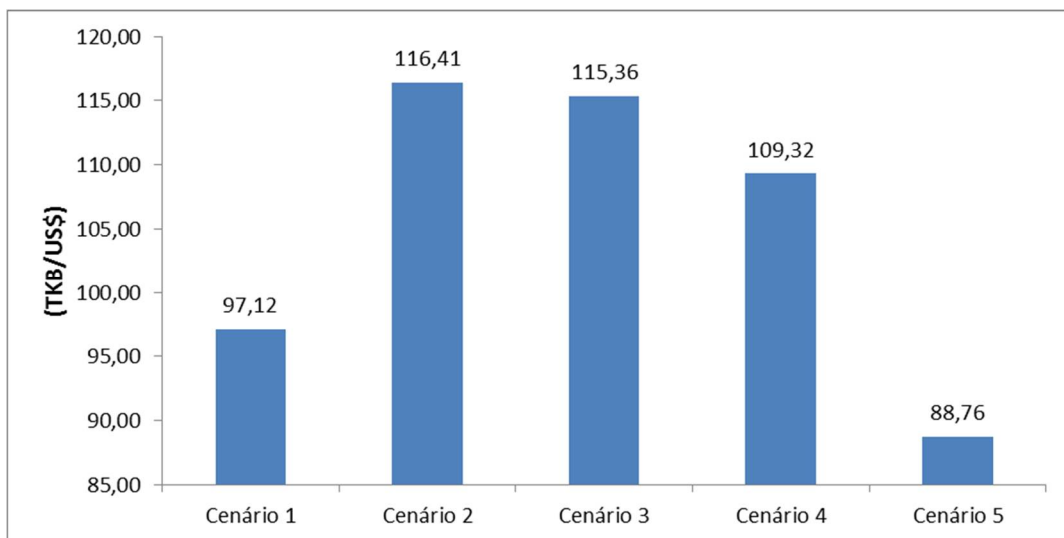
Figura 17 – Eficiência de Custo, considerando apenas o custo dos combustíveis.



Fonte: Autor (2016).

A Figura 18 leva em consideração além dos custos com combustíveis, os custos de instalação e manutenção dos kits *dual-fuel* para utilização de GNL, além da manutenção extra necessária para as locomotivas utilizando o B25. A posição dos cenários se manteve a mesma de antes, com o Cenário 2 apresentando o melhor resultado, porém com menor valor. Isso significa que mesmo levando-se em consideração os custos de manutenção e investimento para que se realize a substituição do diesel por GNL e biodiesel, estas alternativas ainda são melhores do que o modelo atual de operação da ferrovia.

Figura 18 – Eficiência de Custo, considerando o custo dos combustíveis, investimento e manutenção extra necessária para a operação com o GNL e B25.



Fonte: Autor (2016).

## 6.8 ANÁLISE GERAL

O Cenário 1 não apresenta o melhor desempenho para nenhum dos indicadores, apresentando Consumo Total de Energia 2,74% aquém do melhor cenário, Consumo Total de Energia Renovável 79,11% abaixo do melhor, Emissões de Dióxido de Carbono, Monóxido de Carbono, Material Particulado e Óxidos de Nitrogênio 24,16%, 7,65%, 49,89% e 40,03% piores que o melhor cenário, respectivamente. A mesma afirmação é válida para o Cenário 3, apesar deste cenário apresentar custos inferiores em relação ao Cenário 1, gerando um indicador de custos 18,78% melhor. O Cenário 2 mostra o melhor resultado para EE, NO<sub>x</sub> e CE. O Cenário 4 é melhor em emissões de CO<sub>2</sub> e PM. O Cenário 5 é o melhor para RE e CO.

Uma vez que o Cenário 1, sendo o modo de operação atual da EFVM, não apresenta menores custos que os Cenários 2, 3 e 4, a companhia deveria implementar um dos três cenários que melhor atendesse as suas necessidades: eficiência de custos ou redução de emissões. Os Cenários 2, 3 e 4 apresentam custo menor que o Cenário 1 por causa da grande parcela de GNL consumida. Mesmo o biodiesel sendo mais caro que o diesel de petróleo, a grande quantidade de GNL utilizada por esses cenários acaba compensando os custos.

A Tabela 13 resume os resultados, sendo os melhores destacados em negrito. A primeira coluna lista os cenários propostos. A segunda evidencia que o Cenário 2 apresenta o melhor resultado para Consumo Total de Energia (E). A terceira coluna aponta o Cenário 5 como o que mais utiliza energia renovável. As colunas 4, 5, 6 e 7 mostram que os Cenários 4, 5, 4 e 2 emitem menos dióxido de carbono, monóxido de carbono, material particulado e óxidos de nitrogênio que os demais, respectivamente. Já a última coluna aponta o Cenário 2 como o mais eficiente em termos de custos.

Tabela 13 – Resumo dos Resultados

<b>Cenários</b>	<b>E</b>	<b>RE</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>PM</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>CE</b>
Cenário 1	14,20	352	208,95	119.086	330.913	12.085	97,12
Cenário 2	<b>14,60</b>	176	244,97	111.128	614.718	<b>20.152</b>	<b>116,41</b>
Cenário 3	14,59	260	248,42	111.627	620.083	20.050	115,36
Cenário 4	14,53	843	<b>275,53</b>	115.248	<b>660.392</b>	19.362	109,32
Cenário 5	14,06	<b>1.685</b>	244,76	<b>128.956</b>	357.504	11.521	88,76

Fonte: Autor (2016).

Uma análise de sensibilidade da Eficiência de Custos foi realizada considerando flutuações nos preços de combustíveis de -30% a +30% para o B5, B25 e GNL. Considerando estas variações, os resultados máximos e mínimos considerados para cada cenário são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultado da análise de sensibilidade. (TKB/US\$)

	<b>Min.</b>	<b>Atual</b>	<b>Máx.</b>
<b>Cenário 1</b>	74.71	97.12	138.75
<b>Cenário 2</b>	90.87	116.41	161.93
<b>Cenário 3</b>	90.52	115.36	158.98
<b>Cenário 4</b>	88.73	109.32	142.34
<b>Cenário 5</b>	68.48	88.76	126.11

Fonte: Autor (2016).

Como pode ser visto, o Cenário 1 alcança 74,71 TKB/US\$ se o preço do B5 subir 30% e 138,75 TKB/US\$ se reduzir 30%. Se os preços do GNL e B5 reduzirem em 30%, o Cenário 2 alcança 161,93 TKB/US\$. Por outro lado, se o preço de ambos os combustíveis subirem na mesma proporção, o resultado cairia para 90,87 TKB/US\$. Para os Cenários 3 e 4, após flutuações nos preços de todos os combustíveis, a combinação que gerou o resultado mínimo e máximo foi uma variação de -30% e +30% para o B5 e GNL, resultando respectivamente em 90,52 TKB/US\$ e 88,73 TKB/US\$ (mínimos) e 158,98 TKB/US\$ e 142,34 TKB/US\$

(máximos). O Cenário 5 resultou em 68,48 TKB/US\$ se o preço do B25 aumentar 30% e 126,11 TKB/US\$ se cair na mesma proporção.

Para poder comparar os resultados, fez-se necessário colocar todos os valores em uma base comparável e, para tanto, os seguintes critérios foram aplicados aos resultados:

- E, RE, CO<sub>2</sub>, e CE: todos os cenários que mostraram melhores resultados que o Cenário 1 computaram 1 ponto;
- CO: todos os cenários que alcançaram o padrão TIER 4 de emissão computaram 1 ponto, uma vez que o TIER 4 é o padrão de emissão mais restritivo nos Estados Unidos;
- PM e NO<sub>x</sub>: todos os cenários que atenderam ao padrão TIER 3 computaram 1 ponto. Já que o padrão TIER 4 é muito elevado em relação a todos os cenários analisados, o padrão TIER 3 foi adotado por ser o padrão imediatamente inferior ao TIER 4.

Estes critérios foram adotados visando simultaneamente comparar os resultados dos cenários fictícios (Cenário 2 à Cenário 4) entre si e compará-los também em relação ao modo atual de operação da ferrovia, ou seja, comparar os cenários propostos com o Cenário 1. Desta forma, ao se propor uma pontuação para qualquer cenário que tenha valores superiores ao Cenário 1, no caso de E, RE, CO<sub>2</sub>, e CE, é possível realizar a distinção entre o modo de operação atual e os cenários propostos. Lembrando que não há parâmetros de TIER definidos pela EPA para estes indicadores.

Como existem parâmetros de TIER definidos para emissões de CO, PM e NO<sub>x</sub>, estes foram adotados para os indicadores, sendo que, uma vez que existem cenários que atingem o padrão mais elevado para emissões de CO, o TIER 4 foi adotado neste caso. Como para emissões de PM e NO<sub>x</sub> nenhum cenário atinge o padrão TIER 4, o padrão TIER 3 foi adotado como fator de pontuação para estas emissões.

Os resultados normalizados podem ser vistos na Tabela 15. A coluna Cenário mostra o número de cada cenário, as colunas 2 a 8 representam os resultados normalizados obtidos para cada um dos indicadores de eco-eficiência analisados e finalmente, a coluna Total representa a soma de cada valor normalizado para a eco-eficiência.

Tabela 15 –Resultados normalizados

<b>Cenário</b>	<b>E</b>	<b>RE</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>PM</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>CE</b>	<b>Total</b>
Cenário 1	0	0	0	1	0	0	0	<b>1</b>
Cenário 2	1	0	1	1	1	1	1	<b>6</b>
Cenário 3	1	0	1	1	1	1	1	<b>6</b>
Cenário 4	1	1	1	1	1	1	1	<b>7</b>
Cenário 5	0	1	1	1	0	0	0	<b>3</b>

Fonte: Autor (2015).

O Cenário 4 mostrou ser o melhor cenário para implementação na ferrovia. Este cenário associa o uso do gás natural e biodiesel, apresentando custos menores de operação do que o modelo atual da ferrovia e ao mesmo tempo, apresenta emissões mais baixas, com exceção das emissões de CO, mas mesmo assim atende aos requisitos do padrão TIER 4 americano, padrão este o mais restritivo.

Se o Cenário 4 for implementado, em comparação ao Cenário 1 a ferrovia poderia ganhar 2,3% no indicador de eficiência energética, 139% no indicador de energia renovável, 32% em emissão de CO<sub>2</sub>, 100% de MP, 60,0% em NO<sub>x</sub> e 12,6% em Eficiência de Custo. O único indicador que apresenta pior resultado se comparar o Cenário 4 ao Cenário 1 é emissão de CO, com piora no indicador de 3,2%, em função do uso de GNL.

Os resultados demonstram que o método proposto pode ser utilizado como uma ferramenta de suporte para auxiliar a ferrovia a decidir qual a melhor mistura de combustíveis e tecnologia a ser utilizado, para que se possa minimizar o impacto ambiental e custos operacionais da mesma.

## 7 CONCLUSÕES

Esta dissertação propôs um método para medir e avaliar a eco-eficiência das locomotivas de qualquer ferrovia de carga e de passageiro, nacionais ou internacionais. O método proposto avalia tanto as emissões de poluentes quanto os custos de operação com cada combustível. A eco-eficiência foi avaliada por meio de sete medidas: 1) consumo total de energia, 2) consumo total de energia renovável, 3) emissões de dióxido de carbono, 4) emissões de monóxido de carbono, 5) emissões de óxidos de nitrogênio, 6) emissões de material particulado, 7) custos - incluindo custos de operação, manutenção e investimento.

Após a revisão bibliográfica, pôde-se perceber pelas referências publicadas e pesquisadas até o momento, que nenhum método para avaliar a eco-eficiência de locomotivas em ferrovias de carga e de passageiros foi proposto. Assim sendo, este método pode eventualmente servir como referência para estabelecimento de padrões de aferição da eco-eficiência de locomotivas de ferrovias, podendo ser utilizado por governos, bem como pelas próprias operadoras de ferrovias.

O método proposto foi aplicado à Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), uma das mais importantes ferrovias brasileiras. Cinco cenários diferentes representando a troca de combustíveis e tecnologias foram criados, testados e analisados. Os resultados obtidos foram comparados com os padrões da *United States Environmental Protection Agency* (EPA) e mostraram em alguns casos serem capazes de atingir os mais altos padrões de emissão.

O melhor cenário a ser implementado pela ferrovia estudada seria o Cenário 4, que mistura o uso de GNL e biodiesel, apresentando assim custos mais baixos do que o modelo operacional atual e, ao mesmo tempo, menos emissões de poluentes, exceto as emissões de CO, mas mesmo assim atingindo os requisitos do padrão TIER 4 americano, o mais restritivo. Se o Cenário 4 for implementado, em comparação ao Cenário 1 a ferrovia poderia ganhar 2,3% no indicador de eficiência energética, 139% no indicador de energia renovável, 32% em emissão de CO<sub>2</sub>, 100% de MP, 60,0% em NO<sub>x</sub> e 12,6% em Eficiência de Custo. O único indicador que



apresenta pior resultado se comparar o Cenário 4 ao Cenário 1 é emissão de CO<sub>2</sub>, com piora no indicador de 3,2%, em função do uso de GNL.

O método mostrou-se robusto, oferecendo oportunidades de redução de custos e de redução de emissões. Ferrovias podem usar esse método para trazer suas operações para um melhor padrão ambiental, assim como agências reguladoras do governo, tais como a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), podem utilizar do método para definir e fiscalizar indicadores de eficiência ambiental e econômico. Os resultados obtidos apresentam oportunidades para melhorar o desempenho de todos os indicadores de eco-eficiência da ferrovia, e dessa forma reduzir os custos operacionais e as emissões, simultaneamente aumentando a eficiência energética e a utilização de energias renováveis.

O objetivo geral desta dissertação de propor um método para avaliar a eco-eficiência da operação das locomotivas de uma ferrovia, nacional ou internacional, de carga ou de passageiro, que leve em consideração os impactos ambientais e os custos associados à utilização de combustíveis alternativos foi atingido de forma satisfatória, tendo sido alcançados também os objetivos específicos, a saber: realização de levantamento das emissões de gases e particulados para o modelo operacional atual da EFVM; levantamento de combustíveis alternativos já testados em locomotivas da EFVM; comparação e análise dos resultados indicando o melhor mix de combustível para a ferrovia, considerando sua eco-eficiência; e por fim a realização de uma análise dos combustíveis alternativos em comparação ao combustível padrão, diesel B5, analisando seus resultados numa ótica financeira e ambiental.

Este estudo não levou em consideração as emissões geradas durante a produção dos combustíveis, apenas aquelas geradas em consequência do seu consumo. Como próximos passos para o estudo, seria válido considerar as emissões de toda a cadeia de produção, incluindo a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) específico para o transporte, chamado Well-to-Wheel (WTW), e seus efeitos sobre os resultados obtidos até agora. Além disso, sugere-se avaliar também outros combustíveis, tais como o óleo de palma e o B100, estudando seus impactos nas emissões e custos associados.

## REFERÊNCIAS

- ABDELAAL, M. M.; HEGAB, A. H. (2012). **Combustion and emission characteristics of a natural gas-fueled diesel engine with EGR**. *Energy conversion and management*, 64, 301-312.
- ALVES, F.; FIORIO, V. **Como é produzido o etanol?** Disponível em: <<http://www.industriahoje.com.br/como-e-produzido-o-etanol>>. Acesso em 15 de dezembro de 2014.
- ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Evolução do Mercado de Combustíveis e Derivados: 2000-2012**. Brasília: ANP, 2013.
- ANP Nº 16. Disponível em: [http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes\\_anp/2008/junho/ranp%2016%20-%202008.xml](http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2008/junho/ranp%2016%20-%202008.xml). Acessado: 18/07/2014 às 16:52hs.
- ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2014). **Folder institucional**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?dw=2447>. Acessado: 18/07/2014 às 16:52hs.
- ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2014) **Boletim Mensal do Biodiesel**, April 2014. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?dw=70554>. Acessado: 01/08/2014 às 09:48hs.
- ANALISADOR DE GASES TM-131. Disponível em: <http://www.tecnomotor.com.br/novo/index.php/produtos/2015-04-02-20-05-00/tm-131-analisador-de-gases>. Acessado: 24/04/2014 às 18:52hs.
- ANTF, Associação Nacional dos Transportes Ferroviários, 2014, **Balanco do Transporte Ferroviário 2013**. Disponível em: <http://www.antf.org.br/index.php/noticias/5139-balanco-do-transporte-ferroviario-2013>. Acessado: 16/07/2014 às 17:20hs.
- API (American Petroleum Institute). **Environmental Principles**. Disponível em: <[www.api.org](http://www.api.org)>. Acesso em 26 de dezembro de 2014.
- ARB, California Environmental Protection Agency, Air Resources Board, (2014). Disponível em: <http://www.arb.ca.gov/homepage.htm>. Acessado: 03/09/2014 às 20:25hs.
- ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS, **Manual of Standards and Recommended Practices**, Sections C and E, 2008.
- BARANESCU, R.; CHALLEN, B. J. **Diesel Engine Reference Book**. 2 ed. Warrendale, PA: Elsevier, 2003.
- BARBIERI, J. C. **Gestão Ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2007.
- BAUMEL, C. P. (2013). **Future Substitutes for Diesel Fuel in US Truck and Railroad Freight Transportation**. *Journal of the Transportation Research Forum* (Vol. 52, No. 2, pp. 45-64).
- BHATTACHARYA, T. K.; CHATTERJEE, S.; MISHRA, T. N. (2004). **Performance of a constant speed CI engine on alcohol-diesel microemulsions**. *Applied engineering in agriculture*.

BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social). **Diretrizes de Políticas Socioambientais**. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Areas\\_de\\_Atuacao/Desenvolvimento\\_Social\\_e\\_Urbano/Politica\\_Socioambiental/diretrizes.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Areas_de_Atuacao/Desenvolvimento_Social_e_Urbano/Politica_Socioambiental/diretrizes.html)>. Acesso em 10 de novembro de 2014.

BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social). **Folheto sobre a Linha de Meio Ambiente. Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social**. 2007.

CALLENBACH, E. **Gerenciamento ecológico eco management: guia do Instituto Elmwool de auditoria ecológica e negócios sustentáveis**. 1 ed. São Paulo: Cultrix, 1993.

CAN, Ö.; CELIKTEN, I.; USTA, N. (2004). **Effects of ethanol addition on performance and emissions of a turbocharged indirect injection diesel engine running at different injection pressures**. Energy Conversion and Management, 45(15), 2429-2440.

CARRARETTO, C.; MACOR, A.; MIRANDOLA, A.; STOPPATO, A.; TONON, S. (2004). **Biodiesel as alternative fuel: experimental analysis and energetic evaluations**. Energy, 29(12), 2195-2211.

CEBDS (Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável). **Eco-eficiência**, Gazeta Mercantil, 10/08/2005, disponível em:<<http://www.cebds.org.br/cebds/artigos.asp?area=>>. Acesso em 10 de dezembro de 2014.

CEBDS (Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável). Disponível em: <<http://www.cebds.org.br/>>. Acesso em 01 de novembro de 2014.

CEBDS (Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável); SEBRAE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas). **A Produção mais Limpa na Micro e Pequena Empresa**. Rio de Janeiro, CEBDS: SEBRAE, 2004. 32 p. Disponível em:<<http://www.cebds.org.br>>. Acesso em 20 de janeiro de 2015.

CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). **Dióxido de enxofre**. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/laboratorios/fit/dioxido\\_de\\_enxofre.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/laboratorios/fit/dioxido_de_enxofre.pdf)>. Acesso em 07 de janeiro de 2015.

CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). **Emissões Veiculares no Estado de São Paulo – 2012**. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/ar/emissoes/relatorio-2012.pdf>>. Acesso em 17 de dezembro de 2014.

CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). **Material Particulado**. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/Informa??es-B?sicas/21-Poluentes#mp>>. Acesso em 08 de janeiro de 2015.

CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). **Monóxido de carbono**. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/laboratorios/fit/monoxido\\_de\\_carbono.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/laboratorios/fit/monoxido_de_carbono.pdf)>. Acesso em 07 de janeiro de 2015.

CHEENKACHORN, K.; FUNGTAMMASAN, B. (2009). **Biodiesel as an additive for diesohol**. International Journal of Green Energy, 6(1), 57-72.

CHEENKACHORN, K.; POOMPIPATPONG, C.; HO, C. G. (2013). **Performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fuelled with diesel and LNG (liquid natural gas)**. Energy, 53, 52-57.

CNTL (Centro Nacional de Tecnologias Limpas). **Meio ambiente e a pequena e microempresa: módulo 1 - Curso de Formação de Consultores em Produção mais Limpa**. Porto Alegre: 2003. 73 pp.

D'AGOSTO, M. A.; RIBEIRO, S. K.; SOUZA, C. D. R.. **Opportunity to reduce greenhouse gas by the use of alternative fuels and technologies in urban public transport in Brazil**. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 5, n. 2, p. 177-183, 2013.

D'AGOSTO, M.; RIBEIRO, S. K. (2004). **Eco-efficiency management program (EEMP)—a model for road fleet operation**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 9(6), 497-511.

CARO, P. S.; MOULOUNGUI, Z.; VAITILINGOM, G.; BERGE, J. C. (2001). **Interest of combining an additive with diesel-ethanol blends for use in diesel engines**. *Fuel*, 80(4), 565-574.

DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO – DOU. (29/05/2014) Disponível em: <http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=1&data=29/05/2014>. Acessado: 18/07/14 às 14:40hs

DIESELNET. Disponível em: < <https://www.dieselnet.com/standards/us/nonroad.php>>. Acesso em 20 de Junho de 2016.

DIESELNET. Disponível em: < <https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>>. Acesso em 20 de Junho de 2016.

ECYCLE. Disponível em: <<http://www.ecycle.com.br/component/content/article/35/1379-os-perigos-do-material-particulado.html>>. Acesso em 08 de janeiro de 2015.

ECYCLE. Disponível em: <<http://www.ecycle.com.br/component/content/article/63-meio-ambiente/2393-dioxido-de-nitrogenio-oxido-oxidos-o-que-e-onde-esta-presente-fontes-automoveis-motores-queimadas-microbianas-efeitos-saude-bronquite-problemas-respiratorios-autismo-efeitos-no-meio-ambiente-chuva-acida-alternativas-cozinha.html>>. Acesso em 05 de janeiro de 2015.

ELECTRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS - ECFR. Disponível em: [http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr89\\_main\\_02.tpl](http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr89_main_02.tpl)>. Acesso em 20 de Junho de 2016.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/420b16024.pdf>>. Acesso em 20 de Junho de 2016.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Disponível em: <http://www.epa.gov/otaq/standards/nonroad/locomotives.htm>. Acesso de Junho de 2016.

ESTERS, T.; MARINOV, M. (2014). **An analysis of the methods used to calculate the emissions of rolling stock in the UK**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 33, 1-16.

FERNANDES, A. **Análise do Desempenho de Motor Diesel com a utilização de Biocombustível Obtido a Partir do Reuso de Óleo Vegetal**. 2012. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Metodista de Piracicaba. Santa Bárbara d'Oeste, 2012.

GANGWAR, M.; SHARMA, S. M. (2014). **Evaluating choice of traction option for a sustainable Indian Railways**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 33, 135-145.

GENERAL ELECTRIC, GEK-EP-80074 E - **Locomotive Backshop**, Volume 3 - Diesel Engine, 2001

GONÇALVES, Benjamin S. **O compromisso das empresas com o meio ambiente—Agenda Ambiental das Empresas e a Sustentabilidade da Economia Florestal**. São Paulo: Instituto Ethos, 2005.

GUABIROBA, R. C. S.; D'AGOSTO, M. A.; LEAL JR, I. C.; DA SILVA, M. A. V. **Eco-efficiency as an auxiliary measure for the definition of interregional public consortia responsible for the collection of recyclable domestic waste**. *Journal of Cleaner Production*, v. 68, p. 36-45, 2014

HARRINGTON, H. J.; KNIGHT, A. **A implementação da ISO 14000: como atualizar o SGA com eficácia**. 1 ed. São Paulo: Atlas, 2001.

HAY, W. W. (1982). **Railroad engineering** (Vol. 1). John Wiley & Sons.

HOLLIDAY, C.; SCHMIDHEINY, S.; WATTS, P. **Walking the Talk – The Business Case for Sustainable Development**. United Kingdom: Green leaf Publishing, 2002.

HOLT, D. J. (2004). **Alternative diesel fuels**. *Fuel*, 2014, 02-21.

HSU, B. (2002). **Practical diesel-engine combustion analysis**. *Development*, 2004, 03-08.

IPAM (Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia). **Quais são as principais fontes de gases de efeito estufa decorrentes das atividades humanas?** Disponível em: <<http://www.ipam.org.br/saiba-mais/abc/mudancaspergunta/Quais-sao-as-principais-fontes-de-gases-de-efeito-estufa-decorrentes-das-atividades-humanas-/11/3>>. Acesso em 10 de janeiro de 2015.

IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada). **A Mobilidade Urbana no Brasil**. 2015.

JOHNSON, G. R., Jayaratne, E. R., Lau, J., Thomas, V., Juwono, A. M., Kitchen, B., & Morawska, L. (2013). **Remote measurement of diesel locomotive emission factors and particle size distributions**. *Atmospheric Environment*, 81, 148-157.

KHAIR, M. K.; MAJEWSKI, W. A. (2006). **Diesel emissions and their control** (Vol. 303). SAE Technical Paper.

KOBAYASHI, Y.; HIDEKI, K.; HONGU, A.; SANEHIRA, K. **A Practical Method for Quantifying Eco-efficiency Using Eco-design Support Tools**. *Journal of Industrial Ecology*, v. 9, n. 4, p. 131-144, 2005.

LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; & RODRIGUEZ-FERNANDEZ, J. (2008). **Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions**. *Progress in energy and combustion science*, 34(2), 198-223.

LEAL JUNIOR, I. C.; GARCIA, P. A. A.; D'AGOSTO, M. A. **A data envelopment analysis approach to choose transport modes based on eco-efficiency**. *Environment, Development and Sustainability*, v. 14, n. 5, p. 767-781, 2012.

LOBO, I. P.; FERREIRA, S. L. C.; CRUZ, R. S. **Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos**. *Química Nova*, v. 32, n. 6, p. 1596-1608, 2009.

MACOR, A.; AVELLA, F.; FAEDO, D. (2011). **Effects of 30% v/v biodiesel/diesel fuel blend on regulated and unregulated pollutant emissions from diesel engines**. *Applied Energy*, 88(12), 4989-5001.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. 2 ed. Porto: Editora Publindústria 2006.

MAZZOLENI, C.; KUHNS, H. D.; MOOSMÜLLER, H.; WITT, J.; NUSSBAUM, N. J.; CHANG, M. C. O.; WATSON, J. G. (2007). **A case study of real-world tailpipe emissions for school buses using a 20% biodiesel blend**. *Science of the Total Environment*, 385(1), 146-159.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Poluentes Atmosféricos**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos#>>. Acesso em 08 de janeiro de 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2014/05/governo-aumenta-porcentagem-de-biodiesel-no-diesel>>. Acesso em 24 de Abril de 2016.

MISSOURI DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, Jefferson City, Missouri, June, 2011.

MOLL, S.; GEE, D. **Making sustainability accountable: eco-efficiency, resource productivity and innovation: proceedings of a workshop on the occasion of the Fifth Anniversary of the European Environment Agency (EEA) 28-30 October 1998 in Copenhagen**. Office for Official Publications of the European Communities, 1999

MOREIRA, J. T. M. **Indicadores de eco-eficiência como parte do Sistema de Gestão Ambiental das Águas do Ave, S.A: aplicação às ETAR de S. Gonçalo, Esposende e Vila Meã**. 2009. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

MOREIRA, S. M. S. R. **Influência do biodiesel nas emissões poluentes de um motor turbo diesel**. 2012. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2012.

MOTTA, R. A.; SILVA, P. C. M.; BRASIL, A. C. M. **Desafios da mobilidade sustentável no Brasil**. *Revista dos Transportes Públicos*, n. 34, p. 25-48, 2012.

MOTTA, R. S.; HARGRAVE, J.; LUEDEMANN, G.; GUTIERREZ, M. B. S. **Mudança do clima no Brasil: aspectos econômicos, sociais e regulatórios**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada-Ipea, 2011.

MOURA, L. A. A. **Qualidade e Gestão Ambiental**. 5 Ed. São Paulo: Editora Juarex de Oliveira, 2008.

NOGUEIRA, F. G.; SENA, J. A.; FONSECA, M. C.; BARRA, W. (2012). **Design and field tests of a digital control system to damping electromechanical oscillations between large diesel generators**. Intech, Diesel Engines. Intech.

NTU (Associação Nacional das Empresas de Transporte Público). Anuário 2013-2014. 2014.

OCDE. **Eco-Efficiency. Organization for Economic Co-operation and Development. The Organization for Economic Co-operation and Development**, 1998.

OLIVEIRA, F. C. C.; SUAREZ, P. A. Z.; DOS SANTOS, W. L. P. **Biodiesel: possibilidades e desafios**. *Redes*, v. 1, n. 497, 2013.

OLIVEIRA, M. **Diesel de cana: combustível vai ser produzido por meio de transformações genéticas em leveduras**. Disponível em: <[http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2008/11/90\\_91.pdf](http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2008/11/90_91.pdf)>. Acesso em 12 de dezembro de 2014.

- PAPAGIANNAKIS, R. G.; HOUNTALAS, D. T. (2003). **Experimental investigation concerning the effect of natural gas percentage on performance and emissions of a DI dual fuel diesel engine**. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 353-365.
- PAPAGIANNAKIS, R. G.; KOTSIPOULOS, P. N.; ZANNIS, T. C.; YFANTIS, E. A.; HOUNTALAS, D. T.; RAKOPOULOS, C. D. (2010). **Theoretical study of the effects of engine parameters on performance and emissions of a pilot ignited natural gas diesel engine**. *Energy*, 35(2), 1129-1138.
- PAPAGIANNAKIS, R. G.; RAKOPOULOS, C. D.; HOUNTALAS, D. T.; RAKOPOULOS, D. C. (2010). **Emission characteristics of high speed, dual fuel, compression ignition engine operating in a wide range of natural gas/diesel fuel proportions**. *Fuel*, 89(7), 1397-1406.
- PARK, D.; YOON, Y.; KWON, S. B.; JEONG, W.; CHO, Y.; LEE, K. (2012). **The effects of operating conditions on particulate matter exhaust from diesel locomotive engines**. *Science of the Total Environment*, 419, 76-80.
- PEREIRA, C. A. S. **Desenvolvimento dos indicadores de eco-eficiência: aplicação à indústria metalomecânica**. 2001. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente)– Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2001.
- PETROBRAS. Manual técnico: Diesel S10. Disponível em: <<http://www.sindipetro.com.br/arquivos/cartilhas/c0c98afc10ef12d086fedc8e07400707.pdf>>. Acesso em 07 de janeiro de 2015.
- PETROBRAS. Óleo Diesel. Disponível em: <<http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/automotivos/oleodiesel/>>. Acesso em 20 de dezembro de 2015.
- PLAKHOTNIK, V. N.; ONYSHCHENKO, J. V.; YARYSHKINA, L. A. (2005). **The environmental impacts of railway transportation in the Ukraine**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 10(3), 263-268.
- POOMPIPATPONG, C.; CHEENKACHORN, K. (2011). **A modified diesel engine for natural gas operation: Performance and emission tests**. *Energy*, 36(12), 6862-6866.
- PORTAL BIODIESEL. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/biodiesel/biodiesel-brasil.htm>>. Acesso em 10 de dezembro de 2014.
- PORTAL ELETRA. Disponível em: <<http://www.eletrabus.com/>>. Acesso em 01 de dezembro de 2014.
- PORTAL MEIOAMBIENTE.MG. Disponível em: <<http://www.feam.br/component/content/80?task=view>>. Acesso em 10 de janeiro de 2015.
- PORTAL NOVACANA. Disponível em: <<http://www.novacana.com/etanol/anidro-hidratado-diferencas/>>. Acesso em 15 de novembro de 2014.
- PROFILLIDIS, V. A. (2014). **Railway management and engineering**. Ashgate Publishing, Ltd..
- PRONEA (Programa Nacional de Educação Ambiental). **3º Relatório do Programa Nacional de Educação Ambiental**. 3 ed. Brasília: 2005.
- RTWP, Railway Technical Web Pages, (2014) **Diesel Locomotive Technology**, September 2014. Available at: <http://www.railway-technical.com/diesel.shtml>. Accessed: 05/09/2014 at 16:45hs.

- SAHOO, B. B.; SAHOO, N.; SAHA, U. K. (2009). **Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual-fuel gas diesel engines—A critical review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6), 1151-1184.
- SALGADO, V. G. **Indicadores de eco-eficiência e o transporte de gás natural**. 1 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2007.
- SANTANNA, I. **Emissão de gases poluentes por descarga de veículos do ciclo diesel provocadores de deterioramento do meio ambiente: busca de soluções para amenizar ou controlar o problema**. 76f. 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia de Minas Gerais. Minas Gerais, 2012.
- SCHAFFEL, S. B.; LA ROVERE, E.L. **The quest for eco-social efficiency in biofuels production in Brazil**. *Journal of Cleaner Production*, v. 18, n. 16, p. 1663-1670, 2010.
- SCHMIDHEINY, S. **Changing Course: a global business perspective on development and the environment**. 1 ed. London, England: The MIT Press, 1992.
- SEBRAE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas). **Relatório da Rede Brasileira de P mais L 2003**. 2003. Disponível em: <[www.cebds.org.br/cebds/pub-docs/relatorio-sustentabilidadebr/sebrae.pdf](http://www.cebds.org.br/cebds/pub-docs/relatorio-sustentabilidadebr/sebrae.pdf)>. Acesso em 15 de outubro de 2014.
- SEIFFERT, M. E. B. **ISO 14001 sistemas de gestão ambiental: implantação objetiva e econômica**. 1 ed. São Paulo: Atlas, 2005.
- SELIM, M. Y. (2001). **Pressure–time characteristics in diesel engine fueled with natural gas**. *Renewable Energy*, 22(4), 473-489.
- SONG, J.; CHEENKACHORN, K.; WANG, J.; PEREZ, J.; BOEHMAN, A. L.; YOUNG, P. J.; WALLER, F. J. (2002). **Effect of oxygenated fuel on combustion and emissions in a light-duty turbo diesel engine**. *Energy & Fuels*, 16(2), 294-301.
- SONG, S. **Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port**. *Atmospheric Environment*, v. 82, p. 288-297, 2014.
- SOUZA, P. E. **Implantação de sistemas de gestão ambiental em indústrias de embalagens de papel**. 2009. 188f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- THE GREENHOUSE GAS PROTOCOL, Revised Edition. Chapter 9, **Reporting GHG Emissions**. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, March 2004, Title 40 of the U.S. Code of Federal Regulations (CFR), Part 92, Subpart B.
- TIBOR, T.; FELDMAN, I. **ISO 14000: um guia para as novas normas de gestão ambiental**. 2 ed. São Paulo: Futura, 1996.
- UNCTAD, 2004, **A Manual for The Preparers and Users of Eco-Efficiency Indicators**. Disponível em: <[http://www.unctad.org/en/docs/iteipc20037\\_en.pdf](http://www.unctad.org/en/docs/iteipc20037_en.pdf)>. Acesso em 30 de outubro de 2014.
- UNICA (União da Indústria de Cana-de-açúcar). **Produção e uso do etanol combustível no Brasil**. São Paulo: UNICA, 2013.
- VALLE, C. E.do. **Qualidade Ambiental: ISO 14000**. 4. ed. São Paulo: Editora SENAC São Paulo, 2002.
- VAN BASSHUYSEN, R.; SCHÄFER, F. (2004). **Internal combustion engine handbook-basics, components, systems and perspectives** (Vol. 345).



VERGARA, S. C. **Métodos de pesquisa em administração**. 1 ed. São Paulo: Editora Atlas, 2005.

WBCSD; VERFAILLIE, H. A.; BIDWELL, R. **Measuring Eco-Efficiency. A Guide to Reporting Company Performance**. World Business Council for Sustainable Development, 2000.

WBCSD-UNE. **Eco-Efficiency and Cleaner Production: Charting the Course to Sustainability**. United Nations Commission on Sustainable Development (UNCSD) Annual Meeting, New York, 1996.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2000. **Measuring Eco-Efficiency. A Guide to Reporting Company Performance**. World Business Council for Sustainable Development, Geneva.

XUE, J.; GRIFT, T. E.; HANSEN, A. C. (2011). **Effect of biodiesel on engine performances and emissions**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1098-1116.

YANG, Z.; ZHOU, X.; XU, L. **Eco-efficiency optimization for municipal solid waste management**. *Journal of Cleaner Production*, 2014.

YIN, K.; WANG, R.; AN, Q.; YAO, L.; LIANG, J. **Using eco-efficiency as an indicator for sustainable urban development: A case study of Chinese provincial capital cities**. *Ecological Indicators*, v. 36, p. 665-671, 2014.

ZÁRANTE, P. H. B.; SODRÉ, J. R. (2009). **Evaluating carbon emissions reduction by use of natural gas as engine fuel**. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 1(6), 216-220.

ZIMA, S.; GREUTER, E. (2012). **Engine failure analysis: Internal combustion engine failures and their causes**.