UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MÍRIAN SALGADO LOPES

INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA EMPRESA FERROVIÁRIA DE CARGA: ANÁLISE E PROPOSIÇÃO DE UM NOVO MODELO DE REGRESSÃO

JUIZ DE FORA
2018

MÍRIAN SALGADO LOPES

INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA EMPRESA FERROVIÁRIA DE CARGA: ANÁLISE E PROPOSIÇÃO DE UM NOVO MODELO DE REGRESSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em 13 de novembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

D. Sc. Cristina Márcia Barros de Castro (Orientadora)
Universidade Federal de Juiz de Fora

D. Sc. Roberto Malheiros Moreira Filho (Co-orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora

D. Sc. Clarice Breviglieri Porto
Universidade Federal de Juiz de Fora

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração
automática da Biblioteca Universitária da UFJF,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Lopes, Mírian Salgado.
Indicador de eficiência energética de uma empresa ferroviária de carga: análise e proposição de um novo modelo de regressão / Mírian Salgado Lopes. -- 2018.
73 p. : il.

Orientadora: Cristina Márcia Barros Castro
Coorientador: Roberto Malheiros Moreira Filho
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2018.

1. Modelo de regressão linear. 2. Eficiência energética. 3. Matriz de transporte. 4. Modal ferroviário. I. Castro, Cristina Márcia Barros, orient. II. Moreira Filho, Roberto Malheiros , coorient. III. Título.

"O sucesso é a soma de pequenos esforços - repetidos dia sim, e no outro dia também."

(Robert Collier)

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me iluminado ao longo dessa trajetória.

Aos meus pais, pelo apoio e amor incondicional.

À minha irmã, pela amizade e torcida durante todo este percurso.

Ao Guilherme, pelo carinho e por sempre acreditar em mim.

Aos amigos, pelos momentos de diversão e companheirismo.

Aos professores orientadores, Cristina Barros e Roberto Malheiros, por me incentivarem e compartilharem tantos conhecimentos.

À empresa estudada, pela confiança e por permitir que esse trabalho fosse realizado.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo acerca do indicador de eficiência energética de uma empresa ferroviária de carga, bem como analisar e propor um novo modelo de regressão linear que descreva com boa adequação esse indicador. Verificou-se, por meio da pesquisa bibliográfica, que a ferrovia desempenha papel importante na matriz de transporte de cargas no Brasil e que parte significativa dos custos operacionais em uma ferrovia advém de gastos com combustíveis. Por isso, a busca pela melhoria da eficiência energética tem se tornado cada vez maior em empresas ferroviárias, com o intuito de aumentar a competitividade, através da redução significativa nos custos de fretes. No desenvolvimento do novo modelo são analisadas as principais alavancas que impactam diretamente na eficiência energética, visando identificar quais variáveis detém maior poder de explicação do indicador estudado. Através da regressão linear múltipla e de analises estatísticas, o modelo matemático gerado é satisfatório para explicar a variável de interesse e cumpre com os pressupostos de qualidade necessários. Por fim, esta pesquisa evidenciou, estatisticamente, que o indicador de eficiência energética pode ser explicado com alto nível de adequação pelo volume de carga transportada por locomotivas mais eficientes, pela disponibilidade de locomotivas e pela carga útil transportada por cada trem.

Palavras-chave: Modelo de regressão linear**,** eficiência energética, matriz de transporte, modal ferroviário.

ABSTRACT

The purpose of this work is to present a study about the energy efficiency indicator of a load railway company, as well as to analyze and propose a new linear regression model that adequately describes this indicator. It was verified through the bibliographical research that the railroad plays an important role in the load transport matrix in Brazil and that a significant part of the operational costs in a railroad comes from fuel expenses. Therefore, the search for the improvement of the energy efficiency has increased in railway companies, with the intention to enhance competitiveness, through the significant reduction in freight costs. In the development of the new model, the main levers that directly impact on energy efficiency are analyzed, aiming at identifying which variables have the greatest explanatory power of the indicator studied. Through multiple linear regression and statistical analysis, the mathematical model generated explains the variable of interest at a satisfactory level and meets the necessary quality assumptions. Finally, this research statistically showed that the energy efficiency indicator can be explained with a high level of adequacy through the volume of load transported by more efficient locomotives, the availability of locomotives and the payload carried by each train.

Keywords: Linear regression model, energy efficiency, transport matrix, rail modal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição da matriz de transporte de carga no Brasil em 2017 16
Figura 2 – Percentual de participação dos modais rodoviário e ferroviário no mundo.....16
Figura 3 – Composição da matriz de transporte de carga no Brasil em 2025 18
Figura 4 – Movimentação total de carga pela cabotagem 2010-2016 20
Figura 5 – Comparação da eficiência energética entre modais 21
Figura 6 – Competição entre ferroviário e rodoviário 26
Figura 7 – Malha ferroviária operada pela iniciativa privada..... 30
Figura 8 – Mix de produtos mais representativos em 2014. 31
Figura 9 – Relação entre TKB e Eficiência Energética por trechos de um percurso. . 35
Figura 10 – Variáveis que impactam na eficiência energética 37
Figura 11 – Estágios 1-3 no diagrama de decisão de regressão múltipla. 40
Figura 12 – Estágios 4-6 no diagrama de decisão de regressão múltipla 41
Figura 13 – Autocorrelação Durbin-Watson 51
Figura 14 – Modelo de Regressão Linear (I)..... 55
Figura 15 – Modelo de Regressão Linear (II)..... 57
Figura 16 – Box plot das variáveis que irão compor o modelo 60
Figura 17 – Gráfico de dispersão em pares das variáveis independentes..... 61
Figura 18 – Teste de normalidade dos resíduos..... 63
Figura 19 – Histograma dos resíduos 64
Figura 20 – Autocorrelação Durbin-Watson 64
Figura 21 – Modelo de Regressão Linear (III) 66
Figura 22 – Gráfico da comparação da EE conforme os modelos gerados 67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Densidade de ferrovias..... 17
Quadro 2 – Vantagens e desvantagens do modal ferroviário.....26
Quadro 3 – Comparação do setor ferroviário pós-concessão 29
Quadro 4 – Denominação das concessionárias..... 31
Quadro 5 – Principais produtos transportados por cada concessionária..... 32
Quadro 6 – Resumo de gráficos de resíduos e suposições 49
Quadro 7 – Descrição das variáveis..... 53
Quadro 8 – Classificação do coeficiente de correlação. 58
Quadro 9 – Correlação entre as variáveis candidatas a compor o modelo. 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características Operacionais 19
Tabela 2 – Produtos transportados na navegação de cabotagem.....20
Tabela 3 – Principais produtos transportados por empresas do setor rodoviário 23
Tabela 4 – Extensão da malha ferroviária 25
Tabela 5 – Análise de Variância para Teste de Significância 46
Tabela 6 – Coeficientes relacionados à correlação e colinearidade..... 58
Tabela 7 – Correlação entre as variáveis candidatas a compor o modelo 59
Tabela 8 – Tabela de correlação entre as variáveis “independentes”. 62
Tabela 9 – Teste da Variância 65

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11

1.1. JUSTIFICATIVA 12

1.2. ESCOPO DO TRABALHO 12

1.3. ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS 13

1.4. DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA 13

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO 13

2. TRANSPORTE DE CARGA 15

2.1. CARACTERÍSTICAS QUALITATIVAS DO TRANSPORTE DE CARGA 18

2.1.1 Aquaviário 19

2.1.2 Dutoviário 21

2.1.3 Aéreo 22

2.1.4 Rodoviário 22

2.1.5 Ferroviário 24

3. TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA NO BRASIL 27

3.1. PANORAMA DA FERROVIA DE CARGA NO SÉCULO XIX E XX 27

3.2. PROCESSO DE DESESTATIZAÇÃO DA MALHA FERROVIÁRIA BRASILEIRA 28

3.3. PANORAMA ATUAL DA FERROVIA DE CARGA 30

4. INDICADORES NO MODAL FERROVIÁRIO 33

4.1. IMPORTÂNCIA DOS INDICADORES NO MODAL FERROVIÁRIO 33

4.2. INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA 34

4.3. CÁLCULO DO INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA 34

4.4. INDICADOR QUE IMPACTAM O CONSUMO DE ÓLEO DIESEL 35

4.4.1 Carregamento Médio de Vagões 36

4.4.2 Trem Hora Parada (THP) 36

4.4.3 Transit Time **36**

5. ANÁLISE DE REGRESSÃO MÚLTIPLA **38**

5.1. REGRESSÃO MÚLTIPLA 38

5.2. PROCESSO DE DECISÃO PARA ANÁLISE DE REGRESSÃO MÚLTIPLA 38

5.3. MODELO TEÓRICO DA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA 42

5.3.1 Pressuposto do modelo **42**

5.3.2 Representação matricial **42**

5.4. ESTIMAÇÃO DOS PARAMETROS DO MODELO 43

5.4.1 Mínimos quadrados de parâmetros **43**

5.4.2 Propriedade dos estimadores **44**

5.5. TESTE DE HIPOTESE 45

5.5.1 Análise de Variância **45**

5.5.2 R^2 E R^2 Ajustado **46**

5.5.3 Teste para coeficientes individuais **47**

5.5.4 Intervalo de confiança para os erros de especificação **48**

5.6. ANÁLISE DE RESÍDUOS 48

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS **52**

6.1. DETERMINAÇÃO DO MODELO DE REGRESSÃO 54

7. CONCLUSÃO **68**

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **70**

1. INTRODUÇÃO

Há muito se sabe que as ferrovias desempenharam importante contribuição ao desenvolvimento econômico de grande parte das nações nos séculos XIX e XX, principalmente por sua capacidade de movimentar grandes volumes de carga, com alta eficiência energética, principalmente ao longo de distâncias relativamente extensas, com significativa segurança e com menores índices de acidentes e de roubos de carga, quando comparado a outros modais de transporte.

Entretanto, em meados do século XX, o governo brasileiro priorizou o transporte rodoviário, devido a rápida expansão da indústria automobilística, deixando de lado outras modalidades de transporte como o modal ferroviário.

Uma série de fatores econômicos forçou a ocorrência desse evento. Segundo Caixeta-Filho e Martins (2001), com maior ou menor intensidade, a forte regulação estatal no controle de grandes malhas ferroviárias, aliado ao sistema de tarifas propiciou a perda da importância das ferrovias num ambiente de competição entre os modais.

Diante da baixa competitividade das ferrovias de carga, das dificuldades de administrar uma grande extensão de malha ferroviária e com o intuito de aumentar a oferta e melhoria dos serviços ferroviários, na década de 1990, o governo federal colocou em prática ações voltadas para a privatização, concessão e delegação da linha férrea à iniciativa privada (ANTT, 2017).

Atualmente, os 30.402 Km de malha férrea distribuídos pelas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do país, atendendo as regiões do Centro-Oeste e Norte, são controlados por doze concessionárias, sendo onze delas iniciativas privadas e uma empresa pública. As empresas concessionárias são responsáveis por operar, dar manutenção e realizar investimentos nas malhas que detêm.

Uma característica importante do setor de transporte no país é o baixo aproveitamento de fontes não-renováveis de energia, quando comparado com os padrões norte-americanos. Segundo Faria (2006) *apud* Jordão (2006) cerca de 40% do custo de uma ferrovia de carga, correspondem ao consumo de combustível. E o consumo ineficiente de combustível não-renovável gera uma série de consequências, como maior emissão de poluentes, maior custo final de produtos, maior dependência externa de combustíveis e, até mesmo, pior desempenho da balança comercial (PNLT, 2006).

Por esse motivo, é cada vez maior a pressão das ferrovias de carga para a redução dos custos e aumento da eficiência operacional, principalmente a eficiência energética. Em suma, a eficiência energética pode ser entendida como a relação entre a quantidade de óleo diesel consumida para transportar uma quantidade de carga por uma determinada distância (TKB ou TKU).

1.1. JUSTIFICATIVA

O consumo de óleo diesel nas ferrovias de carga corresponde a cerca de 90% dos custos variáveis das empresas (RIBEIRO, 2006). Segundo Olynto (2009), isso corresponde a milhões de reais gastos mensalmente com combustível nas empresas, sendo que uma redução de 1% no consumo proporciona um ganho expressivo na redução dos custos.

Além disso, o gasto desmedido de combustível não renovável influi no meio ambiente e na poluição do mesmo, haja vista que a queima do óleo diesel emite grande quantidade de gás carbônico na atmosfera.

Diante dessas razões, a análise da eficiência energética é um item de grande relevância e com alto valor estratégico para as ferrovias de carga, justificando plenamente a necessidade de um estudo acerca do tema e pesquisas que investiguem quais variáveis impactam no aumento da eficiência energética.

O indicador de eficiência energética correlaciona o consumo de diesel pelas locomotivas e a quantidade de carga transportada por uma determinada distância. Assim, o indicador corrobora para a determinação da eficiência da operação de uma empresa de carga do setor ferroviário. Lembre-se que quanto menor o indicador, maior é a eficiência.

1.2. ESCOPO DO TRABALHO

O escopo do trabalho tem caráter investigativo e é embasado na análise de eventos que vem ocorrendo ao longo do tempo no setor ferroviário. Além disso, o estudo busca analisar o indicador de eficiência energética e propor um novo modelo de regressão linear para tal indicador de uma ferrovia de carga.

Os dados coletados referem-se ao período de Janeiro de 2014 à Dezembro de 2017 e os *softwares* usados para a tratativa dos dados foi MATLAB – MathWorks e IBM SPSS Software.

1.3. ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é apresentar um estudo da eficiência energética de uma empresa ferroviária de transporte de carga, uma vez que o consumo de diesel consiste no maior custo para elas, propondo um novo modelo de regressão linear múltipla para a eficiência energética. Para tanto, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar o panorama dos modais de transporte de cargas no Brasil, com enfoque na importância do transporte ferroviário no novo contexto para o transporte de cargas;
- Apresentar o indicador de eficiência energética nas ferrovias de carga e quais variáveis impactam nele;
- Propor e analisar uma equação matemática que descreva o comportamento da Eficiência Energética por meio de variáveis com alto nível de correlação parcial com o indicador.

1.4. DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia utilizada no presente trabalho tem natureza de uma pesquisa aplicada, devido ao seu interesse prático e por ser orientada à aplicação dos resultados em uma ferrovia de carga (MIGUEL, 2010).

Quanto aos objetivos, pode ser considerada exploratória, por ter em vista a identificação dos indicadores ferroviários que influenciam no consumo de diesel e na geração de tonelada bruta por quilômetro (TKB) e consequentemente no indicador de eficiência energética. Sua forma de abordagem é quantitativa com uso de ferramentas estatísticas para análise dos dados e modelagem de uma equação matemática que descreva a eficiência energética, através de *softwares* como MATLAB – MathWorks e IBM SPSS Software.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de qualificação está estruturado em sete capítulos e apresenta uma visão geral dos modais de transporte, perpassando pelo histórico do modal ferroviário no Brasil e o indicador específico de eficiência energética e sua correlação com outros indicadores. Além

disso, apresenta uma revisão da literatura acerca da regressão linear múltipla, que será utilizada para propor um novo modelo de regressão que descreva a Eficiência Energética.

O capítulo 1 se propõe a apresentar as questões introdutórias do tema abordado, expondo a justificativa do estudo, o escopo do trabalho, os objetivos que motivaram a realizá-lo, bem como a metodologia utilizada para desenvolvê-lo.

O capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica a respeito dos modais de transporte de carga e as características específicas de cada um deles.

O capítulo 3, por sua vez, enfoca o modal ferroviário, apresentando um breve histórico do transporte ferroviário no Brasil evidenciando o panorama do mesmo no passado e na atualidade.

No capítulo 4 é apresentado o indicador de eficiência energética e a influência que outros indicadores exercem sobre o mesmo. Além disso, é apresentado quais variáveis podem impactar na eficiência energética, variáveis essas que serão candidatas a compor o novo modelo de regressão linear do indicador.

Já no capítulo 5 é apresentada uma revisão literária, expondo o conceito de regressão linear múltipla, bem como o modelo teórico, pressupostos, suposições e métodos de validação do modelo.

No capítulo 6 é apresentado a análise dos resultados, evidenciando os testes realizados, análises estatísticas para definição da equação matemática mais adequada para descrever o indicador de eficiência energética, com base em variáveis preditoras. Há ainda uma comparação entre os modelos gerados, explicitando os motivos de um ser melhor que os outros.

Por fim, o capítulo 7 irá discorrer sobre a conclusão da pesquisa e verificar se os objetivos específicos estipulados foram, de fato, alcançados.

2. TRANSPORTE DE CARGA

O transporte é uma das principais funções logísticas, pois além de representar a maior parcela dos custos logísticos na maioria das organizações, ele exerce papel fundamental no desempenho de diversas dimensões do serviço ao cliente (NAZÁRIO, 2000).

Além disso, o setor de transportes está diretamente relacionado ao progresso econômico de um país, haja vista que proporciona maior acessibilidade e mobilidade tanto de mercadorias como de pessoas, viabilizando, assim, os demais setores da economia (OLYNTO, 2009).

Nesse contexto, Fair e Williams (1959) *apud* Martins e Caixeta- Filho (2001) afirmam que:

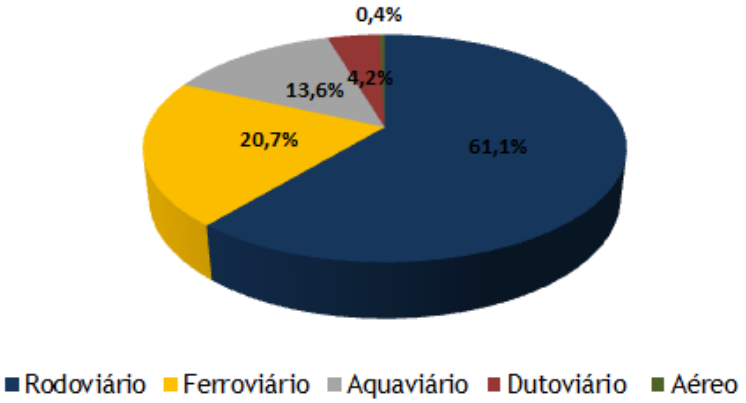
> [...] existem relações recíprocas entre o desenvolvimento do transporte e o progresso econômico, nenhum pode preceder ao outro por um período de tempo razoável em função de suas estreitas relações mútuas. (2001, p. 19)

Desta maneira, considerando a importância do setor de transportes tanto para o desenvolvimento da economia do país quanto para a cadeia de suprimentos das organizações, é necessário compreender as relações entre os diferentes modais de transportes de carga e as características da estrutura de cada um deles.

De acordo com Nazário *apud* Fleury (2000), são cinco os modais de transportes de carga: ferroviário, rodoviário, aquaviário, dutoviário e aeroviário. Ainda conforme o autor, cada um possui características operacionais e de custos que os tornam mais adequados para determinado tipo de produto ou operação, tais como velocidade, disponibilidade, confiabilidade, capacidade e frequência.

Na Figura 1 é apresentada a composição da matriz de transporte de carga no Brasil.

Figura 1 - Composição da matriz de transporte de carga no Brasil em 2017

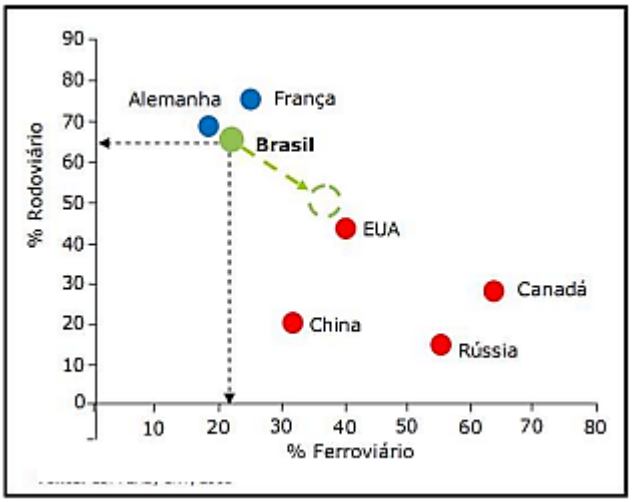


Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados da CNT (2017a)

Observa-se pela Figura 1 que o transporte rodoviário ainda é o mais utilizado no Brasil. Entretanto, segundo Ribeiro (2002), o modal ferroviário vem, cada vez mais, aumentando a participação no transporte de cargas, pois o custo do frete cobrado pelas operadoras ferroviárias é quase 50% mais barato quando comparado ao transporte rodoviário. Além disso, as ferrovias oferecem rapidez e resistência a grandes cargas.

A Figura 2 contrapõe a porcentagem de participação dos modais ferroviário e rodoviário na matriz de transporte de alguns países.

Figura 2 - Percentual de participação dos modais rodoviário e ferroviário no mundo



Fonte: Vilaça (2008a)

A partir da análise da Figura 2, percebe-se que as ferrovias brasileiras possuem uma maior fatia no transporte de cargas quando comparadas às de países desenvolvidos, como a Alemanha. Entretanto, Vilaça (2008) completa a análise evidenciando que o transporte de cargas brasileiro é significativamente diferente daquele encontrado em outros países de

dimensões continentais, principalmente pela densidade de ferrovias em cada um deles, como mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Densidade de ferrovias

Países	Extensão da Malha Ferroviária (km)	Área Territorial (Km^2)	Densidade
Alemanha	45.514	349.223	130,3
França	32.682	545.630	59,9
EUA	194.731	9.158.960	21,3
China	65.650	9.326.410	9,3
Canadá	64.994	9.220.970	7,0
Índia	63.518	2.973.190	21,4
Rússia	87.157	16.995.800	5,1
Brasil	**28.556**	**8.456.510**	**3,4**

Fonte: Vilaça (2008)

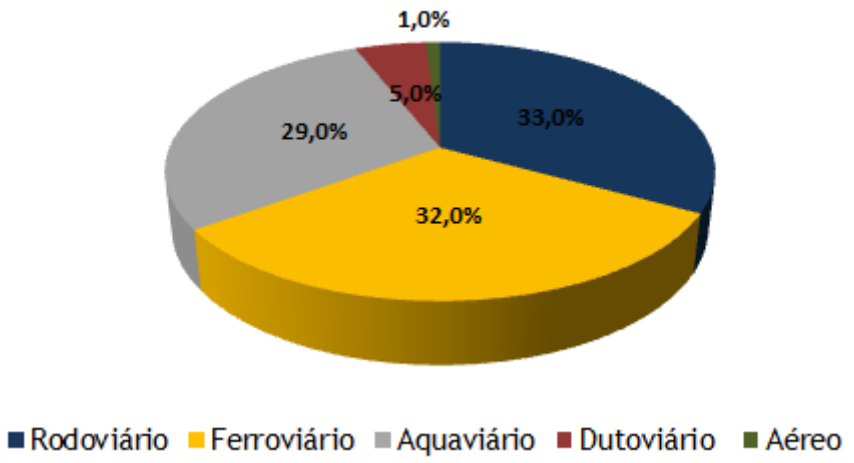
Nesse contexto, Nazário *apud* Fleury (2000) justifica a distorção na matriz de transporte brasileira pela falta de investimentos realizados. Segundo o autor, “Isso é reflexo do baixo nível de investimentos verificado nos últimos anos com relação à conservação, ampliação, e integração dos sistemas de transporte”.

Entretanto, muitas ações estão sendo realizadas pelo governo a fim de atingir uma matriz de transporte bem dividida e recuperar os modais de transportes, reduzindo os níveis de ineficiência em números de acidentes, os tempos de viagem e os custos de transporte (OLYNTO, 2009).

As principais ações do governo estão pautadas em duas principais vertentes: incentivo ao modelo intermodal e a descentralização da malha rodoviária federal, com o intuito de maximizar a eficiência do transporte de carga no Brasil (OLYNTO, 2009).

A Figura 3 apresenta a matriz de transporte planejada para o Brasil para o ano de 2025.

Figura 3 - Composição da matriz de transporte de carga no Brasil em 2025



Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados da ANUT (2004) e PNLT (2007)

2.1. CARACTERÍSTICAS QUALITATIVAS DO TRANSPORTE DE CARGA

Para se escolher o modal certo para o transporte de um determinado produto ou mercadoria, deve-se observar as características operacionais relativas a cada tipo de transporte. De acordo com Nazário *apud* Fleury *et al*. 2000: 130), em relação aos modais, há cinco pontos importantes para se classificar: velocidade, disponibilidade, confiabilidade, capacidade e frequência.

Para Olynto (2009), a escolha adequada entre os tipos de modais- rodoviário, ferroviário, aéreo, aquaviário e dutoviário- devem ser pautadas no grau de impacto de serviços e custos na rede logística.

Na Tabela 1 são apresentadas as características por cada modal, sendo que a pontuação menor significa que o modal possui excelência naquela característica.

Tabela 1 - Características Operacionais

Características	Ferroviário	Rodoviário	Aquárviário	Dutoviário	Aéreo
Velocidade	3	2	4	5	1
Disponibilidade	2	1	4	5	3
Confiabilidade	3	2	4	1	5
Capacidade	2	3	1	5	4
Frequência	4	2	5	1	3
Resultado	**14**	**10**	**18**	**17**	**16**

Fonte: Nazário *apud* Fleury *et al*. (2000)

A seguir serão descritas as principais características de cada tipo de modal de transporte de carga.

2.1.1 Aquaviário

A principal característica do setor aquaviário é a utilização de rios, lagos e oceanos para o deslocamento de pessoas e mercadorias dentro de um mesmo país ou entre diferentes nações, podendo ser subdividido entre fluvial, que utiliza os rios navegáveis, o marítimo, que abrangem a circulação por toda costa oceânica e o de cabotagem, que corresponde a navegação ao longo da costa brasileira (CNT, 2017).

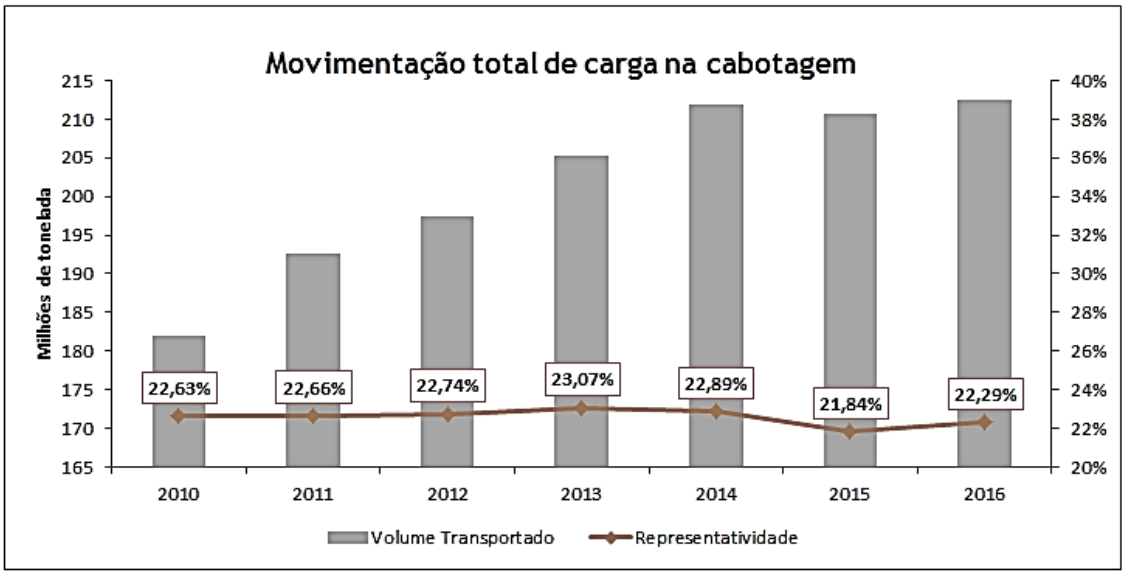
Segundo dados da Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2017), o Brasil tem uma costa de 8.000 quilômetros e mais de 40.000 quilômetros de via permanente navegável. Mesmo assim, o modal aquaviário responde por somente 13% da movimentação de cargas no Brasil. Nas exportações, a representatividade é maior: mais de 90% das cargas vendidas ao exterior são transportadas em navios.

Entre os principais produtos movimentados pelo modal aquaviário, pode-se destacar o granel sólido (63,1%), granel líquido e gasoso (21,9%), carga centralizada (10,0%) e carga geral (5,1%) (CNT, 2017).

“Destacando-se na movimentação de cargas pela costa brasileira, a navegação de cabotagem, foi o setor que mais evoluiu nos últimos três anos dentre as diferentes modalidades” (MARLINVERNI, 2003), embora o resultado ainda não seja tão expressivo.

A Figura 4 apresenta o gráfico da evolução da quantidade de carga transportada pela cabotagem e qual a sua representatividade no modal aquaviário.

Figura 4 - Movimentação total de carga pela cabotagem 2010-2016



Fonte: Elaborado pela autora a partir de CNT (2017b)

Dentre os produtos transportados pelo sistema de cabotagem, os principais são listados na Tabela 2.

Tabela 2 - Produtos transportados na navegação de cabotagem

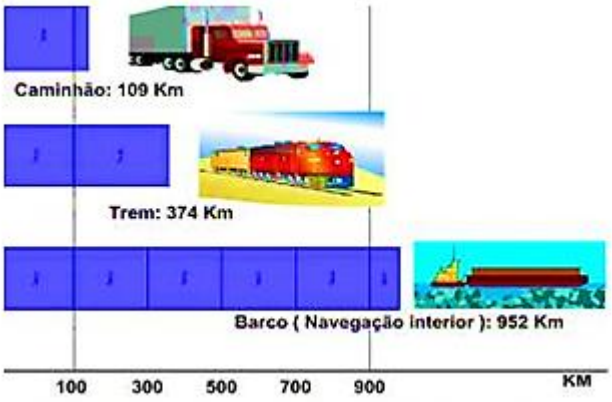
Produto	%
Alimentos	20,8%
Produtos Químicos e inflamáveis	17,7%
Celulose e papel	10,0%
Eletroeletrônicos	9,2%
Material de Construção	6,9%
Produtos de higiene e limpeza	5,4%
Produtos metalúrgicos	4,6%
Veículos e autopartes	3,8%
Moveis e utensílios domésticos	3,8%
Embalagens e vasilhames	3,8%
Rações	3,1%
Madeira e derivados	3,1%
Minérios	2,3%
Outros	5,5%

Fonte: CNT (2005)

Diante do que foi exposto, observa-se que em um país de grandes dimensões, como o Brasil, em que a costa marítima acompanha cerca de 50% do perímetro territorial, o modal aquaviário no contexto de transportes do país tem grande relevância. E, a cabotagem vem se mostrando uma excelente alternativa, principalmente pelas suas características.

Entre todos os modais o transporte hidroviário é o mais econômico. Além disso, é pouco poluente, seguro, possui maior capacidade de carga, manutenção mais barata e maior vida útil (OLYNTO, 2009). Do ponto de vista energético, ainda é o que apresenta maior eficiência energética. A Figura 5 apresenta a distância em quilômetros no qual uma tonelada pode ser transportada utilizando a energia de um galão de combustível:

Figura 5 - Comparação da eficiência energética entre modais



Fonte: Olynto (2009)

2.1.2 Dutoviário

O transporte dutoviário consiste naquele efetuado no interior de uma linha de tubos ou dutos, permitindo que os produtos sejam transportados por pressão ou arraste dos mesmos através de um elemento transportador.

No Brasil, os dutos de transporte ocupam uma extensão de cerca de 16 mil quilômetros (COELI, 2004 *apud* REIS e LEAL, 2007). Entretanto, esse modal é limitado pelo tipo de produtos transportados, que podem ser somente aqueles sob forma de gás, fluido ou líquido. Assim, esse modal não apresenta nenhuma flexibilidade no trajeto do transporte.

Do ponto de vista econômico, essa modalidade de transporte tem se revelado como uma das formas mais econômicas para transporte de grandes volumes, principalmente nos casos de óleo, gás natural e derivados, especialmente quando comparados com as modalidades rodoviária e ferroviária (ANTT, 2017).

> O modal dutoviário teve sua importância valorizada quando da exploração comercial do petróleo e da distribuição de seus derivados, especialmente nos EUA. Para utilizá-lo eficientemente necessita-se de uma constância operacional e de grandes volumes do produto a ser transportado. Possui a vantagem da pequena interferência com a ocupação do solo e significativa segurança em relação a externalidades do sistema. Suas limitações referem-se à operação com poucos tipos de cargas. (BUSTAMANTE, 1999, p. 109)

2.1.3 Aéreo

O modal de transporte aeroviário é caracterizado pelo transporte de cargas ou passageiros realizado no ar, por meio de aeronaves de diferentes portes e velocidades. Essa modalidade é a que apresenta maior rapidez, principalmente para longas distâncias, embora seu custo operacional seja mais elevado quando comparado aos demais modais (FILHO, 2012).

Em relação às principais características no transporte aéreo, Bustamante afirma que:

> Na divisão da matriz do transporte de cargas brasileiro, este é o modal de menor expressividade. Esta opção modal distinguiu-se pela sua acessibilidade pontual (aeroportos e campos de pouso), rapidez, segurança e flexibilidade de roteamento. Possui baixa capacidade e um dos maiores custos energéticos e ainda demanda elevados investimentos na implantação de infra-estrutura e integração intermodal. (1999, p. 156)

Esse modal de transporte pode ser usado para o deslocamento de todos os tipos de carga, desde que ela não ofereça nenhum risco à aeronave, passageiros, aos operadores, a quaisquer outros envolvidos e às outras cargas transportadas (OLYNTO, 2009). Entretanto, nos últimos anos as principais cargas transportadas são as de elevado valor agregado e composições de carga perecíveis, como por exemplo, flores hortifrúti, medicamentos e outras (ALVARENGA; NOVAES, 2000).

2.1.4 Rodoviário

“Este setor caracteriza-se pela flexibilidade operacional com reduzidas restrições de acessibilidade provocadas normalmente por questões de seguranças operacionais ou topografia” (BUSTAMANTE, 1999).

Esse modal é responsável pela movimentação de aproximadamente 60% do volume total transportado no Brasil, consumindo, para tanto, cerca de 90% do combustível total

demandado pelo setor de transporte (BARTHOLOMEU, 2002 *apud* GONÇALVES; MARTINS, 2008).

Diante disso, o modal rodoviário ainda é o mais expressivo no transporte de cargas no Brasil, atingindo praticamente todos os pontos do território nacional, com uma rede rodoviária de 1.720.756 de quilômetros de extensão, conforme aponta Pesquisa CNT de Rodovias (2016). Entretanto, a mesma pesquisa mostra que somente 211.468 quilômetros das ferrovias são pavimentados, o que representa 12,3% do total da malha rodoviária.

Nesse contexto, apesar da disponibilidade do modal rodoviário no transporte de cargas ser maior que o de outros modais, a falta de uma infraestrutura adequada compromete consideravelmente o transporte, tornando-o pouco eficiente.

Os principais produtos transportados pelo modal rodoviário e os respectivos percentuais de frequências, foram agrupados na Tabela 3. Observe que o somatório dos valores percentuais supera os 100%, pois algumas empresas têm mais de um tipo de produto principal.

Tabela 3 - Principais produtos transportados por empresas do setor rodoviário

Produtos	Porcentagem
Minério	9,20%
Carvão	3,40%
Produtos Agrícolas	31,6,%
Adubos Fertilizantes	14,10%
Combustíveis	5,30%
Madeira	1,00%
Química e Petroquímica	2,40%
Siderúrgico	16,00%
Carga Geral	6,30%
Material de Construção	27,20%

Fonte: CNT (2016)

Outra característica relevante do transporte rodoviário de cargas é o custo cobrado pelo transporte. Por via de regra, o mesmo apresenta preços de frete mais elevados do que os modais ferroviário e hidroviário, portanto é mais utilizado para transporte de mercadorias de alto valor ou perecíveis.

Já em relação aos custos fixos do transporte rodoviário, os mesmos tendem a ser baixos (rodovias estabelecidas e construídas com fundos públicos), porém seu custo variável (combustível, manutenção, etc.) em geral são médios.

Segundo Alvarenga e Novais (2000) a relação de custos fixos e variáveis se dá da seguinte maneira:

> Do custo operacional do transporte de cargas, cerca de 85% são relacionados com os custos diretos e o restante corresponde aos custos indiretos. Os custos diretos são ainda subdivididos em custos variáveis e custos fixos. No caso do transporte rodoviário de carga a variável operacional de referência é a quilometragem percorrida pelo veículo. Assim, para os custos variáveis tem-se: combustível, lubrificação, manutenção e pneus. Para os custos fixos, destacam-se: depreciação, remuneração do capital, salários e obrigações do motorista e cobertura de risco. (2000, p. 140)

2.1.5 Ferroviário

Transporte ferroviário é aquele realizado por locomotivas e vagões, sobre um par de trilhos equidistantes entre si, cuja finalidade principal é o transportar tanto pessoas como de mercadorias. Atualmente, este modal encontra-se capacitado para transportar qualquer tipo de mercadoria, porém as mais transportadas neste modal, no Brasil, são basicamente aquelas de baixo valor agregado e em grandes quantidades (PEREIRA *et al*, 2013).

Segundo (BUSTAMANTE, 1999; ALVARENGA; NOVAES, 2000), o transporte ferroviário é caracterizado principalmente por sua capacidade de movimentar grandes volumes de carga, com alta eficiência energética, principalmente ao longo de distâncias relativamente extensas, significativa segurança, em relação ao modo rodoviário, com menores índices de acidentes e de roubos de carga. Porém, possui baixa acessibilidade quando do atendimento na origem da demanda e ainda são necessários altos investimentos na implantação e manutenção da infraestrutura.

No Brasil, uma característica importante da malha ferroviária são os diferentes tamanhos de bitola, definido como o espaçamento entre os trilhos. Existem 3 tipos de bitola: larga (1,60m), estreita (1,00m) e a mista, sendo esse tipo o mais utilizado, em 22.219 km do total de 28.190 km (78,8%). Destaca-se que grande parte da malha ferroviária do Brasil está concentrada nas regiões sul e sudeste com predominância para o transporte de cargas.

O Tabela 4 mostra a quantidade da malha e o tipo de bitola que são operadas por cada empresa.

Tabela 4 - Extensão da malha ferroviária

Operadoras	Origem	Extensão (km)			
		Bitola larga (1,60 m)	Bitola estreita (1,00 m)	Bitola mista	Total[xxx]
América Latina Logística Malha Norte - ALLMN	-	735	-	-	735
América Latina Logística Malha Oeste - ALLMO	RFFSA	-	1.953	-	1.953
América Latina Logística Malha Paulista - ALLMP	RFFSA	1.533	305	269	2.107
América Latina Logística Malha Sul - ALLMS	RFFSA	-	7.223	-	7.223
Estrada de Ferro Carajás - EFC (Vale)	-	997	-	-	997
Estrada de Ferro Vitória a Minas - EFVM (Vale)	-	-	888	-	888
Ferrovia Centro-Atlântica - FCA	RFFSA	-	6.904	137	7.041
Ferrovia Norte-Sul Tramo Norte - FNS (Valec - subconcessão)	-	745	-	-	745
Estrada de Ferro Paraná Oeste - Ferroeste	-	-	248	-	248
Ferrovia Tereza Cristina - FTC	RFFSA	-	163	-	163
MRS Logística - MRS	RFFSA	1.708	-	91	1.799
Ferrovia Transnordestina Logística - FTL	RFFSA	-	4.257	20	4.277
Ferrovia Norte-Sul Tramo Central (Valec - subconcessão)	-	815	-	-	815
Trombetas, Jari e Amapá	-	70	230	-	300
Total	-	6.603	22.171	517	29.291

Fonte: ANTT (2015)

Com relação aos custos ambientais, o transporte ferroviário é mais indicado, uma vez que a emissão de poluentes pelas locomotivas é menor, além de gerar baixo impacto ambiental na construção da infraestrutura necessária ao transporte. O nível de segurança é ainda superior quando comparado ao modal rodoviário, pois o risco de acidentes, roubos e furtos é proporcionalmente inferior. Isso reduz os custos sociais do transporte ferroviário (CNT, 2014).

O Quadro 2 apresenta as vantagens e desvantagens do transporte ferroviário de acordo com suas características.

Quadro 2 - Vantagens e desvantagens do modal ferroviário

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Grande capacidade de carga	Alto custo de implantação
Elevada eficiência energética	Diferença na largura das bitolas
Baixo custo de transporte	Percursos sujeitos a obstruções
Baixo custo de manutenção	Transporte lento
Maior segurança em relação ao rodoviário	Baixa flexibilidade
Reduzido impacto ambiental para a construção da infraestrutura	Baixa integração entre os estados brasileiros
Componentes com longa vida útil	

Fonte: Saraiva e Maelher (2013)

Dado que o grande diferencial do modal ferroviário é a capacidade de transportar grandes volumes de carga, essa característica torna-se mais expressivo quando a tonelagem a ser transportada é relativamente alta, independente da distância a percorrer. A Figura 6 busca ilustrar qual modal é mais vantajoso com relação a essas duas variáveis, quantidade de carga transportada (toneladas) e distância (km) (CNT, 2013).

Figura 6 - Competição entre ferroviário e rodoviário

Fonte: CNT (2013)

Pela análise da Figura 6 é possível concluir que acima de 40t o modal ferroviário é preferível em relação ao rodoviário, independente da distância. Para cargas entre 27 e 40 toneladas tem-se uma competição entre qual dos dois modais seria melhor. Porém, à medida que a distância aumenta, o modal ferroviário apresenta-se como mais vantajoso. Já para o transporte de carga abaixo de 27t o modal rodoviário se torna mais indicado.

3. TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA NO BRASIL

3.1. PANORAMA DA FERROVIA DE CARGA NO SÉCULO XIX E XX

O processo de construção da malha ferroviária no Brasil começou ainda no século XIX e o modal ferroviário foi um dos grandes responsáveis pelo desenvolvimento do país, haja vista que foi o primeiro meio a transportar um volume grandioso de carga a longa distância, de maneira rápida e segura (CAIXETA-FILHO; MARTINS, 2001).

Segundo Caixeta-Filho e Martins (2001), o modal ferroviário contribuiu positivamente para o país, pois permitiu a integração de regiões de difícil acesso, facilitando o deslocamento de cargas onde o sistema hidroviário não atingia, além de possibilitar o povoamento de áreas até então despovoadas, na medida em que a ferrovia se interiorizava pelo país.

A primeira ferrovia brasileira surgiu em 1854, com a construção da primeira linha, de extensão de 15 km, que interligava a Praia da Estrela - RJ à Serra Petrópolis (RODRIGUES, 2004). A partir deste marco, iniciou-se a construção de outras ferrovias em diversos estados do Brasil, à saber, a Recife – São Francisco, a Bahia – São Francisco, Santos – Jundiaí e a Estrada de Ferro Central do Brasil (DNIT, 2006).

As primeiras ferrovias construídas no Brasil eram particulares e independentes e se destinavam exclusivamente ao escoamento de produtos agrícolas, principalmente café e açúcar, até os portos, nos quais eram comercializadas e exportadas para outros países.

Entretanto, na década de 1950, a ferrovia foi aos poucos sendo substituída pelo modal rodoviário que, na época, representava um salto à modernidade com o advento de novas tecnologias. As consequências dessa política que privilegiou o setor rodoviário foram a ineficiência do setor ferroviário, nas últimas décadas, operando uma frota sucateada em vias com estado de má conservação e traçados antigos e desfavoráveis (OLYNTO, 2009).

Segundo Caixeta-Filho e Martins (2001), outro fator crucial que propiciou a perda da competitividade do modal ferroviário e consequentemente a consolidação da rodovia no Brasil foi:

> [...] o fato das ferrovias serem muito extensas e sofrerem forte regulação estatal, com um sistema de tarifas que baseava-se no valor das mercadorias transportadas. Esses aspectos, comparados com o transporte de baixa escala, com pouca intervenção governamental e com fretes baseados nos custos, centralizado pelo transporte rodoviário, foram decisivos para a perda da importância das ferrovias num ambiente de competição entre os modais. (2001, p. 27)

Já em meados do século XX, houve a unificação administrativa das dezoito estradas de ferro pertencentes à União, com uma extensão total de 37.000 km de linhas espalhadas por todo o território nacional. No ano de 1957 foi criada pela Lei n.º 3.115 a sociedade anônima Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA), com a finalidade, de acordo com o DNIT (2006), de administrar, explorar, conservar, reequipar, ampliar e melhorar o tráfego das estradas de ferro da União.

A partir daí, em 1969, as ferrovias que compunham a RFFSA foram agrupadas em quatro sistemas regionais, sendo eles: o Sistema Regional Nordeste, o Sistema Regional Centro, o Sistema Regional Centro-Sul e o Sistema Regional Sul (DNIT, 2006).

3.2. PROCESSO DE DESESTATIZAÇÃO DA MALHA FERROVIÁRIA BRASILEIRA

Diante das dificuldades de administrar uma grande extensão de malha ferroviária e com o intuito de aumentar a oferta e melhoria dos serviços ferroviários, na década de 1990, o governo federal colocou em prática ações voltadas para a privatização, concessão e delegação da linha férrea à iniciativa privada (ANTT, 2017).

Em 1990 deu-se início ao processo de reestruturação do setor de transportes no Brasil, com a criação do Programa Nacional de Desestatização – PND, segundo Lei n.º 8.031/90. Mas somente em 1992 o processo de desestatização do setor ferroviário foi iniciado, a partir da inclusão da Rede Ferroviária Federal S.A. - RFFSA no PND, pelo Decreto n.º 473/92, que propiciou o início da transferência de suas vias, oficinas, terminais, locomotivas e vagões, infraestrutura para a iniciativa privada, durante um período de 30 anos, prorrogáveis por mais 30.

Dentre os principais objetivos do Plano Nacional de Desestatização, pode-se destacar a desoneração do Estado, melhoria da alocação de recursos, aumento da eficiência operacional, desenvolvimento do mercado de transportes e melhoria da qualidade dos serviços.

E os objetivos pretendidos acerca do Plano Nacional de Desestatização foram alcançados. O repasse do controle operacional da malha ferroviária à iniciativa privada gerou um montante de 1,2 bilhões de dólares, além de aumentar os investimentos no setor de transporte ferroviário por parte das concessionárias, o que acarretou um aumento da demanda pelo transporte ferroviário (CNT, 2017; ANTT, 2017).

No que se refere ao setor público, os ganhos foram ainda maiores. As concessões permitiram uma arrecadação de cerca de R$ 8 bilhões com os pagamentos das outorgas das

concessões e arrendamentos (entre 1996 e 2014). Além de possibilitar economias em relação ao déficit operacional da RFFSA que, em 1994, registraram R$ 641,46 milhões (em valores de 2014) (CNT, 2015).

Outros resultados alcançados decorrentes do processo de desestatização foram os ganhos de desempenho operacional nas malhas concedidas, principalmente devido ao aumento de produtividade do pessoal, das locomotivas e vagões, bem como na redução dos tempos de imobilização, do número de acidentes e dos custos de produção, passando o transporte de carga ferroviário a ser uma alternativa ao transporte rodoviário (OLYNTO, 2009).

Pode-se apontar ainda que houve melhorias significativas no que tange a modernização do sistema férreo. Foram realizados investimentos em novas tecnologias, aumento de parcerias com clientes e operadores logísticos, diversificação e segmentação da oferta dos serviços aos clientes. Além disso, foram desenvolvidas ações de responsabilidades sociais permanentes e campanhas educativas, preventivas e de conscientização de segurança (OLYNTO, 2009).

O Quadro 3 mostra a comparação do setor ferroviário pós- concessão:

Quadro 3 - Comparação do setor ferroviário pós-concessão

	1997	2015	%
Produção ferroviária (bilhões de TKU)	137,0	491,0	+258,42%
Volume transportado (bilhões de TU)	252,9	331,72	+31,17%
Índice de acidentes	75,5	13,0	-82,78%
Investimentos Totais (R$ milhões)	560,1	6503,0	+1061,04%

Fonte: ANTT (2015)

Esses resultados revelam substancial melhoria e modernização no sistema ferroviário. Entretanto, muito ainda deve ser feito pelas ferrovias para atingir números satisfatórios, em especial, em relação à circulação, pois parte da malha brasileira ainda tem a velocidade máxima permitida abaixo de 50 Km/h e ainda ocorrem muitas interferências em centros urbanos.

3.3. PANORAMA ATUAL DA FERROVIA DE CARGA

Segundo dados da ANTT (2015), o Sistema Ferroviário Brasileiro detém uma malha de 30.402 km de extensão, distribuído pelas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do país, atendendo as regiões do Centro-Oeste e Norte. A malha ferroviária brasileira é composta por doze malhas concessionadas, sendo onze delas concedidas à iniciativa privada e uma à empresa pública, duas malhas industriais locais privadas e uma malha operada pelo estado do Amapá. As empresas concessionárias são responsáveis por operar, dar manutenção e realizar investimentos nas malhas que detêm.

As onze malhas concedidas à iniciativa privada podem ser observadas na Figura 7.

Figura 7 - Malha ferroviária operada pela iniciativa privada

Fonte: ANTF (2011)

Com as mudanças na razão social, as concessionárias passaram a ter as novas denominações. A correspondência entre as concessionárias iniciais e as atuais pode ser vista no Quadro 4.

Quadro 4 - Denominação das concessionárias

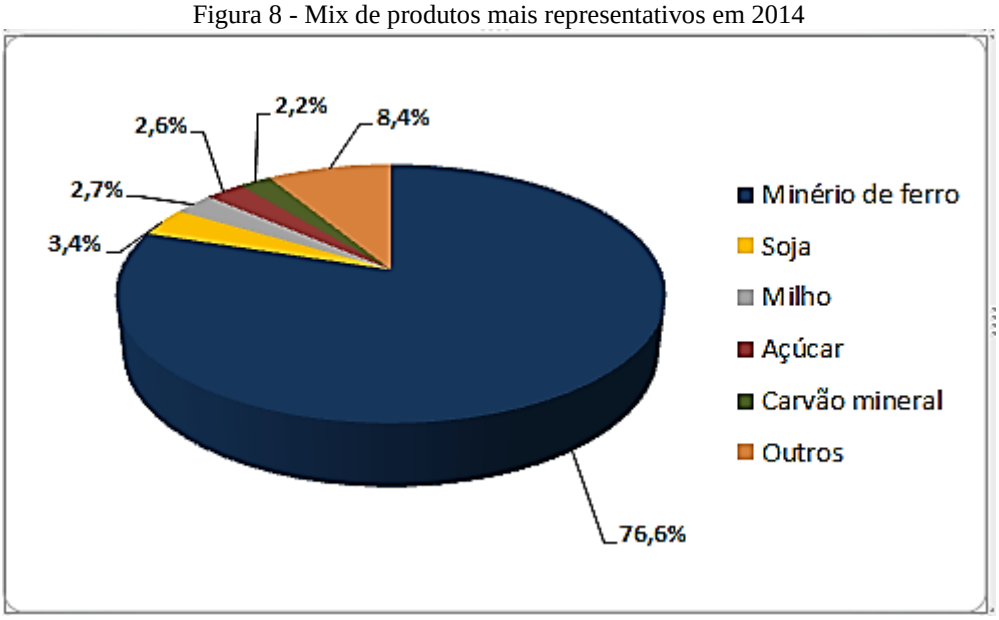
Iniciais	Atuais
FERRONORTE - Ferrovias Norte Brasil S.A	ALLMN - América Latina Logística Malha Norte S.A.
NOVOESTE - Ferrovia Novoeste S. A.	ALLMO - América Latina Logística Malha Oeste S.A
FERROBAN - Ferrovia Bandeirantes S.A.	ALLMP - América Latina Logística Malha Paulista S.A.
ALL - América Logistica do Brasil S.A.	ALLMS - América Latina Logística Malha Sul S.A.
VALE S.A. - EFC - Estrada de Ferro Carajás	VALE S.A. - EFC - Estrada de Ferro Carajás
FERROESTE – Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A	FERROESTE - Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A
VALE S.A. - EFVM - Estrada de Ferro Vitória a Minas	VALE S.A. - EFVM - Estrada de Ferro Vitória a Minas
FCA - Ferrovia Centro - Atlântica S.A.	FCA - Ferrovia Centro - Atlântica S.A.
VALEC S.A. - FNS - Ferrovia Norte Sul (Tramo Norte)	FNS - Ferrovia Norte Sul S.A. (Subconcessionária)
VALEC S.A. - FNS - Ferrovia Norte Sul (Tramo Sul)	VALEC S.A. - FNS - Ferrovia Norte Sul (Tramo Sul)
FTC - Ferrovia Tereza Cristina S.A.	FTC - Ferrovia Tereza Cristina S.A.
CFN - Companhia Ferroviária do Nordeste S.A	FTL S/A – Ferrovia Transnordestina Logística S.A.
MRS Logistica S.A.	MRS Logística S.A.

Fonte: ANTT (2015)

As cargas tipicamente transportadas pelas ferrovias são: produtos siderúrgicos, grãos, minério de ferro, cimento e cal, adubos e fertilizantes, derivados de petróleo, calcário, carvão mineral e clínquer, contêineres, dentre outras, sendo a maior parte delas voltada para exportação

A Figura 8 apresenta o gráfico do mix de produtos transportados mais representativos no ano de 2014.

Figura 8 - Mix de produtos mais representativos em 2014



Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados da ANTT (2015c)

O Quadro 5 apresenta a relação das cargas mais transportadas por cada concessionária.

Quadro 5 - Principais produtos transportados por cada concessionária

Concessionárias	Produtos				
ALLMN	Grãos - Milho	Soja	Farelo de Soja	Celulose	
ALLMO	Celulose	Minério de Ferro	Prd. Siderúrgicos - Outros	Ferro Gusa	
ALLMP	Açúcar	Óleo Diesel	Gasolina	Contêiner Vazio de 40 Pés	
ALLMS	Soja	Açúcar	Grãos - Milho	Óleo Diesel	
EFC	Minério de Ferro	Manganês	Ferro Gusa	Outros - Comb e derivado - Perigoso	
EFPO	Contêiner Cheio de 40 Pés	Soja	Grãos - Milho	Óleo Vegetal	
EFVM	Minério de Ferro	Carvão Mineral	Prd. Siderúrgicos - Bobina - BF	Coque	
FCA	Soja	Grãos - Milho	Açúcar	Farelo de Soja	Minério de Ferro
FNS	Soja	Grãos - Milho	Celulose	Óleo Diesel	Minério de Ferro
FTC	Carvão Mineral	Contêiner Cheio de 20 Pés	Contêiner Cheio de 40 Pés	Contêiner Vazio de 20 Pés	Contêiner Vazio de 40 Pés
MRS	Minério de Ferro	Açúcar	Cimento a Granel	Prd. Siderúrgicos - Outros	Outras
FTL SA	Óleo Diesel	Cimento acondicionado	Gasolina	Prd. Siderúrgicos - Bobina - BF	Minério de Ferro

Fonte: ANTT (2015)

No Brasil, o minério de ferro é responsável por 76 % do total de mercadorias transportadas pelas linhas férreas, sendo o principal produto. É notória a tamanha relevância deste produto quando se faz a comparação com o segundo produto mais movimentado, a soja, que representa apenas 3,4 % (CNT, 2015).

Pela análise, observa-se que o transporte ferroviário brasileiro vem apresentando resultados positivos depois do período de concessão, mas são necessários ainda investimentos significativos nas ferrovias e uma maior integração entre os modais de transporte para a ferrovia aumente sua participação no transporte de cargas no Brasil e apresente resultados satisfatórios.

4. INDICADORES NO MODAL FERROVIÁRIO

4.1. IMPORTÂNCIA DOS INDICADORES NO MODAL FERROVIÁRIO

Os indicadores corporativos ou de um processo específico são essenciais ao planejamento e controle organizacional, pois constituem a base do planejamento. Eles são responsáveis por estabelecer medidas verificadoras do cumprimento de metas e objetivos e sinalizar o rumo que a organização está seguindo. Assim, facilita a ação da gerência, proporcionando maior segurança na tomada de decisão.

Segundo Takashina (1997) *apud* Camargo (2000), os indicadores desencadeiam processos de melhorias incrementais e revolucionários na organização, quando permitem, mediante valores comparativos referenciais, demonstrar o posicionamento dos processos e, consequentemente, da organização no mercado em que atua.

Nas ferrovias, os indicadores desempenham papel ainda mais relevante, devido à alta competição com outros modais de transporte, notório no setor de carga. Segundo Castelo Branco (1998) *apud* Albuquerque (2006) os resultados das empresas ferroviárias devem ser avaliados, especialmente no contexto brasileiro, onde muitas empresas foram privatizadas e, por esta razão, devem se ajustar ao mercado obtendo bons resultados, uma vez que estes são monitorados pelos próprios dirigentes, pelos clientes e órgãos reguladores do Poder Concedente.

A construção de um indicador deve ser pautada na base teórica das definições de um processo e na contribuição para a tomada de decisão gerencial. Em função disso, são necessários cuidados quando do estabelecimento da coleta e tratamento de dados, que constituem a base para a formação do indicador.

Takashina e Flores (1997) afirmam que um indicador deve ser empregado criteriosamente, observando-se sua importância no processo e assegurando a disponibilidade da informação no menor tempo possível e com base em dados confiáveis. Para tanto, na construção de um indicador é necessário avaliar vários critérios, destacando-se entre eles a seletividade ou importância, simplicidade e clareza, abrangência, rastreabilidade e acessibilidade, comparabilidade, estabilidade e rapidez de disponibilidade, bem como baixo custo de obtenção.

Importante ressaltar ainda que a escolha dos indicadores correlaciona-se às particularidades de cada sistema ou processo. Neste caso, é prudente analisar os fatos que

influenciaram cada indicador e garantir que todos os envolvidos compreendam efetivamente o que cada indicador está realmente avaliando.

4.2. INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética nas empresas ferroviárias é entendida como o consumo relativo de combustível e esse indicador corrobora para a determinação da eficiência operacional de uma ferrovia.

Segundo Jordão (2006), o indicador de eficiência energética pode ser compreendido como a relação do consumo de combustível consumido por locomotiva para tracionar uma quantidade de carga por uma determinada distância. Vaz (2008), por sua vez, afirma que a participação do combustível consumido nos custos de uma ferrovia depende do perfil de cada empresa, como o tipo de carga e as distâncias médias percorridas, e o seu rendimento energético.

Jordão (2006) ainda afirma que "uma locomotiva apresenta bom resultado em eficiência energética caso economize no consumo de combustível e/ou aumente a carga bruta tracionada no trem". Portanto, deve-se obter ganho na eficiência energética da locomotiva aumentando sua autonomia, ou seja, ampliando a distância percorrida pelo trem sem precisar reabastecer o tanque da mesma.

Diante disso, uma das grandes preocupações das ferrovias tem sido encontrar maneiras de reduzir o consumo relativo de óleo diesel pelas locomotivas, aumentando a produtividade e otimizando os custos. Entretanto, existem algumas variáveis que influenciam na eficiência energética e merecem ser analisadas.

4.3. CÁLCULO DO INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O cálculo do indicador de eficiência energética é dado pela quantidade de litros gastos para transportar uma tonelada quilômetro bruta (TKB). O TKB reflete algumas medidas importantes para uma ferrovia de carga, como por exemplo, a tonelada bruta transportada de trens carregados e vazios e a distância percorrida.

O indicador de eficiência energética é expresso em unidade litros por 1000 toneladas quilômetro bruto (L/KTKB), relacionando para um determinado período, o total de litros consumidos, o volume de transporte e a distância em que foi efetuado o transporte (RIBEIRO *et al.*, 2006).

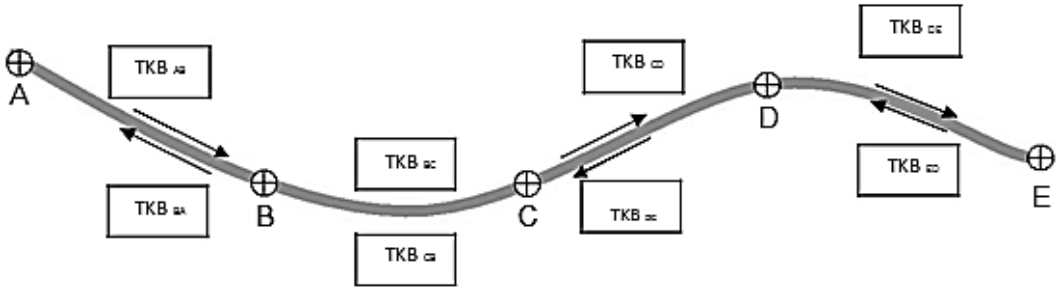
A Equação (1) apresenta a forma de cálculo.

$$EE = \frac{Litros}{TonBrutaKM10^{-3}} = \frac{Litros}{TKB} \quad (1)$$

Olynto (2009) propõe ainda que a geração do número de TKB's dos vagões se dá através do número de TBT's (Tonelada Bruta Transportada) multiplicado pelas respectivas distâncias entre pares origem e destino. Os TKB's dos vagões vazios é resultado direto do desbalanceamento dos vagões existentes quando todos os fluxos são consolidados.

A eficiência energética também pode ser calculada para um trecho específico, somando os litros de combustível gasto em cada um dos trechos e os TKB's gerados para cada trecho, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Relação entre TKB e Eficiência Energética por trechos de um percurso



Fonte: Olynto (2009)

A Equação (2) mostra como é o cálculo da Eficiência Energética para o trecho AE.

$$EE_{TRECHO\ AB} = \frac{Litros_{AB} + Litros_{BC} + \cdots + Litros_{DE} + Litros_{CB} + Litros_{BA}}{10^{-3}(TKB_{AB} + TKB_{BC} + \cdots + TKB_{DE} + TKB_{CB} + TKB_{BA})} \quad (2)$$

4.4. INDICADOR QUE IMPACTAM O CONSUMO DE ÓLEO DIESEL

Um indicador exerce papel relevante em uma organização, pois fornece insumos importantes para o planejamento, monitoramento e controle de um determinado processo. No caso do indicador de Eficiência Energética, o monitoramento e a correta avaliação dos dados, revelam como o consumo está sendo afetado para mais ou para menos e como está a produção (OLYNTO, 2009).

Entretanto, existem outros indicadores que podem suportar e justificar o comportamento do indicador de Eficiência Energética. E, por esse motivo, faz-se necessário a análise dos impactos desses indicadores no desempenho da operação.

A seguir são apontados os principais indicadores ferroviários que afetam a eficiência energética em uma ferrovia de carga.

4.4.1 Carregamento Médio de Vagões

O carregamento médio de vagões é definido como a produtividade média dos vagões no transporte de carga, ou seja, o quanto de TU (Tonelada Útil) ele está transportando. A relação desse indicador é dada pela quantidade de TU tracionada e a quantidade total de carregamento dos vagões. Assim, sua unidade é TU/ VAGÃO. Em termos de eficiência energética, esse indicador fornece a relação de tração por carga transportada (Hp/ton) e quanto maior o carregamento do vagão menor a relação Hp/ton.

4.4.2 Trem Hora Parada (THP)

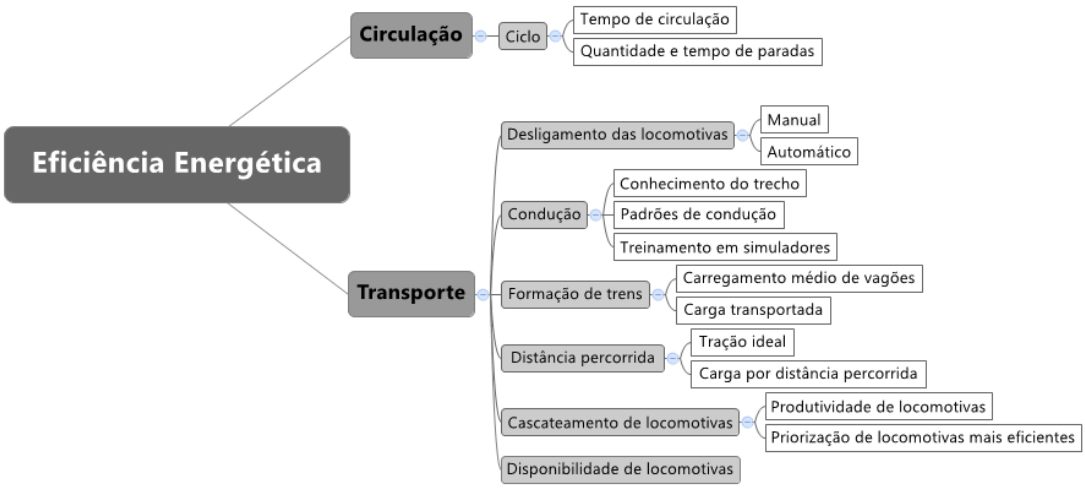
O indicador de trem hora parada é definido como a soma total de tempo que um trem ficou parado na via. Esse indicador tem estreita relação com o indicador de Eficiência Energética, pois impacta diretamente no consumo de combustível. Toda parada do trem exige uma arrancada, o que consome grande volume de óleo diesel.

4.4.3 Transit Time

O indicador de *transit time* é definido como o tempo médio que o trem gasta em um percurso, ou seja, a quantidade de horas que gasta em uma viagem de ida e volta. Em termos de eficiência energética, através desse indicador é possível verificar os tempos alocados nas viagens e identificar se houve grandes impactos das restrições de velocidade da linha ou de paradas em pátios, sendo necessário estar de marcha lenta. Nesse caso, quanto maior o *transit time*, teoricamente maior o consumo de combustível sem grande produção de TKB.

Além desses indicadores que exercem impacto expressivo no indicador de eficiência energética, existem outras variáveis que podem estar relacionadas ao resultado de eficiência de uma ferrovia de carga, como segue.

Figura 10: Variáveis que impactam na eficiência energética



Fonte: Adaptado de Rocha (2013)

5. ANÁLISE DE REGRESSÃO MÚLTIPLA

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica da definição do modelo de Regressão Linear Multivariada e as técnicas de estimação, bem como as análises de validação de um modelo de regressão.

5.1. REGRESSÃO MÚLTIPLA

Segundo Hair (2009), a análise de regressão múltipla consiste em uma técnica estatística que pode ser usada para analisar a relação entre uma única variável dependente, denominada critério, e várias variáveis independentes, denominada preditoras.

O autor ainda aponta que o objetivo principal dessa técnica é prever quais são os valores de uma única variável dependente selecionada e objeto de estudo, a partir do conhecimento das variáveis independentes, cujos valores são conhecidos.

Cada variável independente contribui para o modelo de regressão com um peso específico. O conjunto das várias variáveis independentes ponderadas representa o modelo de regressão, que pode ser entendido como uma combinação linear dos fatores que melhor prevê a variável independente.

Weisberg (2005) aponta que o modelo de regressão múltipla é uma técnica simples, haja vista que expressa a relação entre as muitas variáveis em termos de uma função matemática, visando resumir os dados observados de uma maneira mais simples, útil e elegante. Por esse motivo, optou-se por utilizar esse método de análise neste estudo.

5.2. PROCESSO DE DECISÃO PARA ANÁLISE DE REGRESSÃO MÚLTIPLA

O ponto de partida necessário para utilizar a técnica de regressão múltipla é identificar os fatores que afetam a criação, estimação, interpretação e validação de uma análise de regressão.

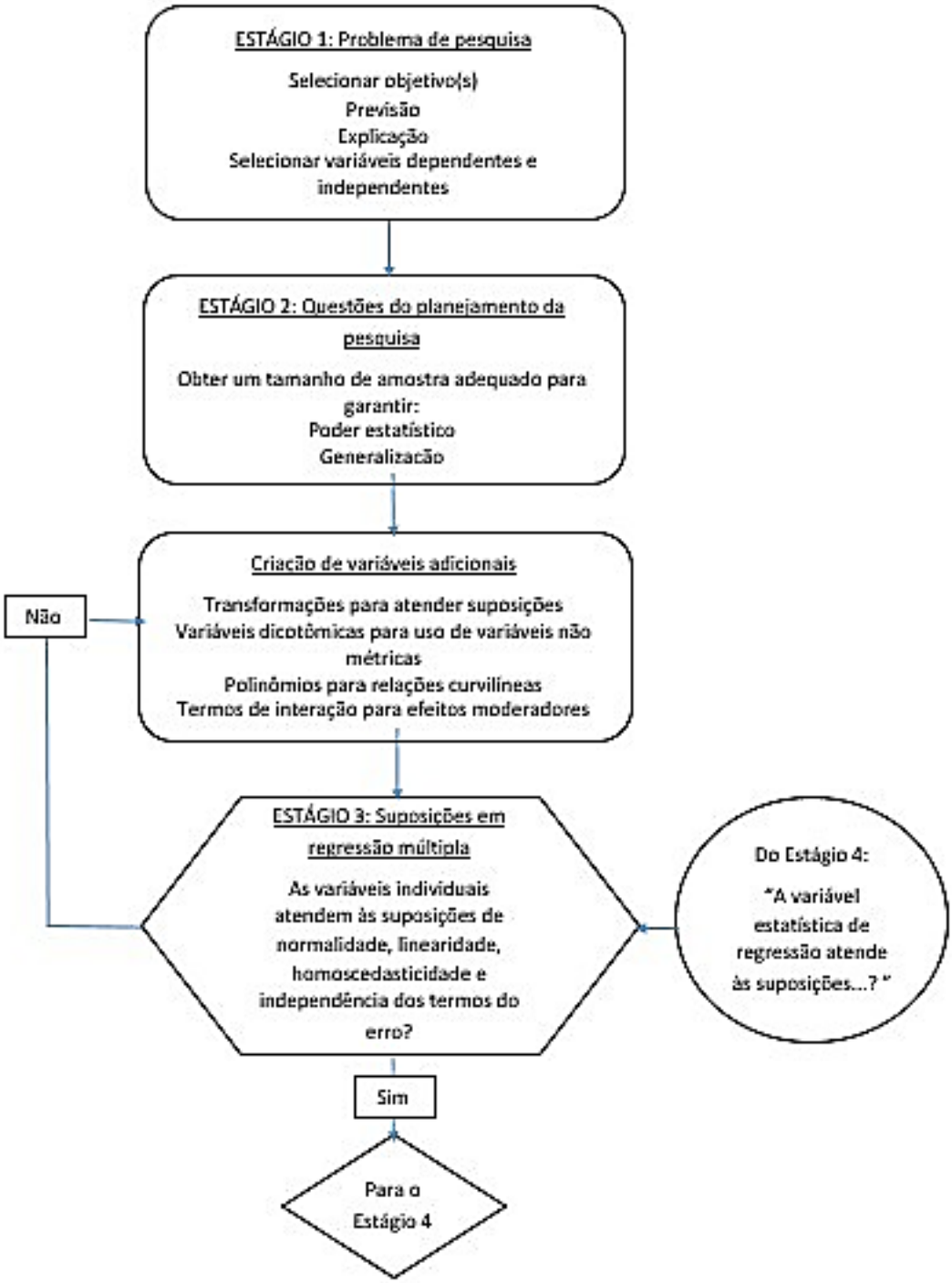
Reis (2001) *apud* Corrar (2007) faz uma reflexão coerente sobre essa questão:

> O truque na estatística multivariada, se existe, não está nos cálculos, mas consiste em escolher o método mais apropriado ao tipo de dados, usá-lo corretamente, saber interpretar os resultados e retirar deles as conclusões corretas. (2007, p. 11)

Diante disso, a Figura 11 e 12 apresenta, em forma de fluxograma, o processo para a construção do modelo de regressão múltipla e seus respectivos estágios.

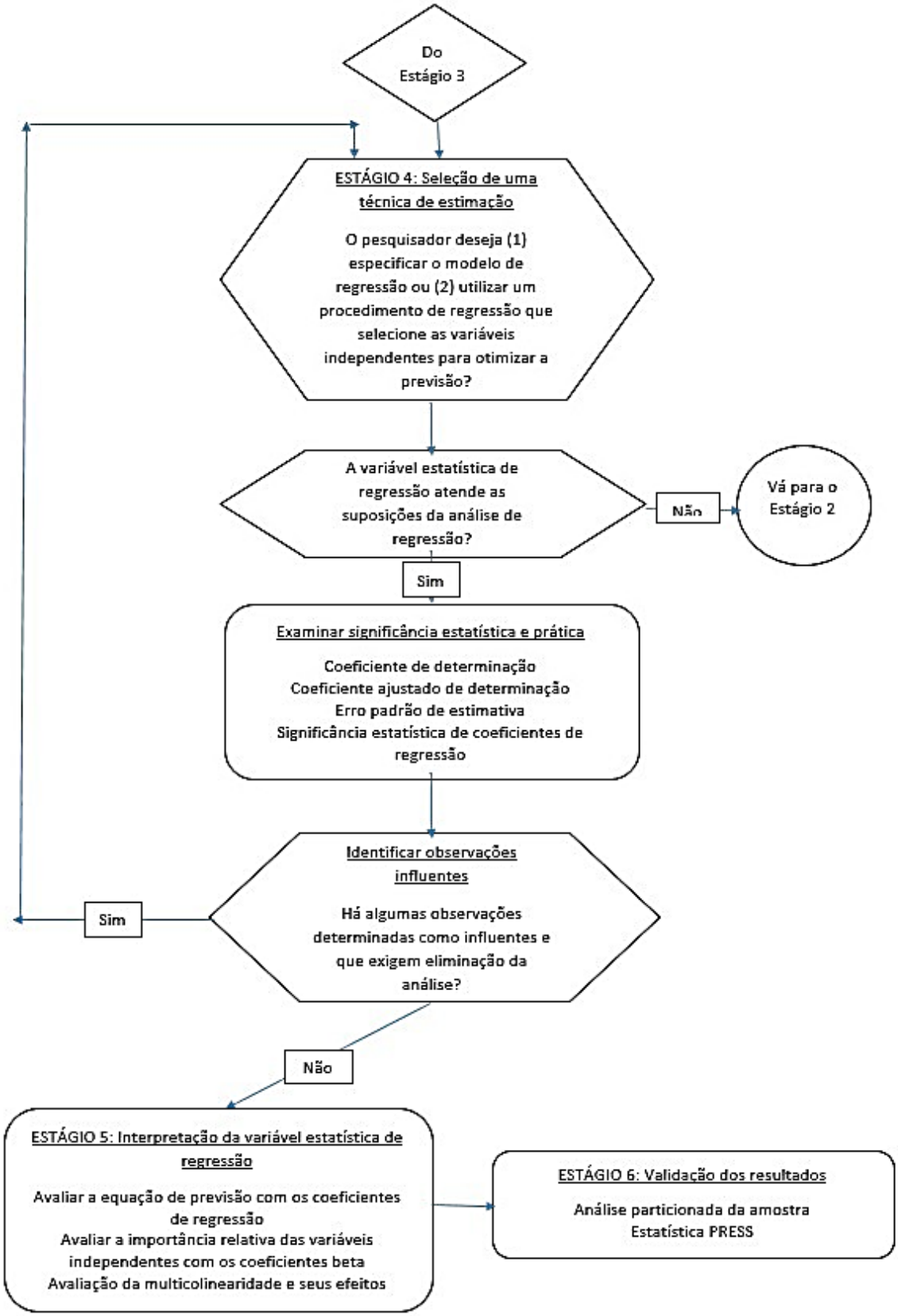
O estágio 1, da Figura 11, se inicia com a especificação dos objetivos da análise, bem como com a definição da variável dependente e das variáveis independentes. Já no estágio 2 é a fase de planejamento da análise de regressão, levando em consideração o tamanho apropriado da amostra e a necessidade de transformação de variáveis. No estágio 3, com o modelo de regressão formulado, é a fase de teste das suposições da análise de regressão linear múltipla para as variáveis individuais. Caso as suposições sejam atendidas, então o modelo será estimado. No estágio 4 na Figura 12, por sua vez, é a etapa de escolha da técnica de estimação que melhor se ajusta ao objetivo da pesquisa. Vale a pena destacar que os mais comuns são as técnicas de estimação *forward, backward* ou *stepwise.* Já no estágio 5, deve ser analisada o modelo estatístico de regressão e qual o efeito da multicolinearidade das variáveis independentes. Por fim, no estágio 6 ocorre a validação dos resultados encontrados.

Figura 11 – Estágios 1-3 no diagrama de decisão de regressão múltipla



Fonte: HAIR *et al* (2009) *apud* LOPES (2015)

Figura 12 – Estágios 4-6 no diagrama de decisão de regressão múltipla



Fonte: adaptado de HAIR *et al* (2009) *apud* LOPES (2015)

5.3. MODELO TEÓRICO DA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Segundo HAIR (2009), a regressão linear múltipla é uma modelagem linear geral que usa de duas ou mais variáveis independentes na previsão de uma variável independente. O modelo teórico de regressão linear múltipla é descrito pela seguinte equação linear 3:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \cdots + \beta_\rho X_\rho + \varepsilon \tag{3}$$

Onde:

- Y é o valor da variável dependente;
- Xi são os valores das variáveis independentes (constantes conhecidas);
- βi são parâmetros ou coeficientes de regressão;
- ε é o erro aleatório do modelo.

5.3.1 Pressuposto do modelo

Ao definir o modelo da equação (3) estamos a pressupor que:

- $E[\varepsilon] = 0$

  Os erros aleatórios são independentes
- $V[\varepsilon] = \sigma^2\ (variáveis\ constantes)$

  Os erros tem distribuição normal

Destes pressupostos conclui-se que $\varepsilon \sim N(0; \sigma^2)$ e consequentemente Y tem distribuição normal com variância σ^2.

5.3.2 Representação matricial

O modelo de regressão pode ser reescrito em forma de notação matricial conforme a equação (4):

$$Y = X\beta + \varepsilon \tag{4}$$

Onde:

$$\boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \text{ e } \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

- Y é um vetor (n x 1) observações da variável resposta;
- X é uma matriz (nx p) dos níveis das variáveis independentes;
- β é um vetor (p x 1) dos coeficientes de regressão;
- ε é um vetor (n x 1) dos erros aleatórios;
- Matriz X é a matriz modelo.

5.4. ESTIMAÇÃO DOS PARAMETROS DO MODELO

Supondo que, de fato, existe uma relação entre a variável dependente e as variáveis independentes, (Y) e (X), é necessário estimar os parâmetros do modelo (βi).

Segundo Maroco (2003), a estimação dos parâmetros (βi) foi proposta por Karl Gauss com o intuito de minimizar a soma dos quadrados dos desvios, denominando este processo de método dos mínimos quadrados.

5.4.1 Mínimos quadrados de parâmetros

O método dos mínimos quadrados pode ser compreendido como a obtenção dos estimadores dos coeficientes de regressão ($\hat{y}$), minimizando a soma de quadrados dos resíduos (SQR). Para Corrar (2009) esse método oferece a melhor função que propicia o menor resíduo estatístico, calculado como a diferença entre os valores observados y_i e os valores estimados $\hat{y}$.

$$e = y - \hat{y} \tag{5}$$

A partir daí, o objetivo é encontrar o vetor dos estimadores quadrados que minimize, na Equação 6:

$$L = \sum_{i=1}^{n} \quad \in_i^2 = \in' \in = (y - X\beta)'(y - X\beta) \tag{6}$$

Fazendo a derivada da equação (6) e igualando-a a zero, tem-se a Equação 7:

$$\beta = (XX')^{-1}X'y \tag{7}$$

Sendo os elementos da diagonal X'X as somas dos quadrados dos elementos nas colunas de X e os elementos fora da diagonal, as somas dos produtos cruzados dos elementos nas colunas de X e dos valores observados da variável controle (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

$$(\mathbf{X'X}) = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^{n} x_{i1} & \sum_{i=1}^{n} x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_{ik} \\ \sum_{i=1}^{n} x_{i1} & \sum_{i=1}^{n} x_{i1}^2 & \sum_{i=1}^{n} x_{ik} x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_{i1} x_{ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum_{i=1}^{n} x_{ik} & \sum_{i=1}^{n} x_{i1} x_{ik} & \sum_{i=1}^{n} x_{i1} x_{ik} & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_{ik}^2 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{X'y} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} y_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_{i1} y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{n} x_{ik} y_i \end{bmatrix}$$

Em notação matricial, o modelo pode ser resumido na Equação 8:

$$\hat{y} = X\,\hat{\beta} \tag{8}$$

Onde:

$\hat{y}$= valores estimados

X= colunas de X

$\hat{\beta}$= coeficientes de regressão

5.4.2 Propriedade dos estimadores

Os estimadores de mínimos quadrados são ditos não tendenciosos, haja vista que os erros ϵi são independentes com média zero e variância σ^2 (Montgomery; Runger, 2012).

A esperança e a variância dos estimadores são dadas pelas Equações 9 e 10, respectivamente:

$$E(\hat{\beta}) = \beta \tag{9}$$

$$V(\hat{\beta}_j) = \sigma^2 C_{ij}\,, \quad para\ j = 1,2,3 \ldots \tag{10}$$

Vale ressaltar ainda que quando σ^2 for substituído por sua estimativa $\hat{\sigma}^2$ a raiz quadrada da variância estimada do j- ésimo coeficiente de regressão será denominada erro padrão estimado, na Equação 11:

$$ep = (\hat{\beta}j) = \sqrt[2]{C_{ij}\hat{\sigma}^2} \tag{11}$$

5.5. TESTE DE HIPOTESE

O teste de hipótese é caracterizado por testar a significância da regressão linear ao determinar os βi e verificar se assim existe uma relação das variáveis independentes, X_1, X_2,...X_k que explique a variável dependente Y. As hipóteses de teste são:

$$\begin{cases} H_0: \beta_1 = \beta_2 = \cdots = \beta_k = 0 \\ H_1: \beta_j \neq 0; para\ no\ mínimo\ um\ j \end{cases}$$

Quando rejeita-se Ho, significa que existe pelo menos uma variável independente, cuja contribuição é representativa para o modelo testado.

A seguir alguns testes a serem realizados que permitem verificar se existem variáveis independentes que contribuem para o modelo.

5.5.1 Análise de Variância

A análise de variância baseia-se na decomposição da soma dos quadrados total, SQT, dado pela variação da variável dependente, na soma dos quadrados explicada, SQR, dada pela variação da variável resposta que é explicada pelo modelo e na soma dos quadrados dos resíduos, SQE, dada pela variação da variável resposta que não é explicada pelo modelo (RODRIGUES, 2012).

Para realizar o teste, pode-se usar a análise de variância (ANOVA), descrita abaixo:

$$\sum y_i^2{}_{STQ} = \widehat{\beta}'x'y \quad - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)^2}{n}{}_{SQR} + y'y\frac{\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)^2}{n}\left[\hat{\beta}x'y - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)^2}{n}\right]_{SQE} \quad (12)$$

Onde STQ é a soma total dos quadrados e tem n-1 graus de liberdade. Já SQR é a soma do quadrado dos resíduos e tem k graus de liberdade, pois é uma função de $\hat{\beta}_i$. E, sob H_0 aceito, SQE segue uma distribuição qui- quadrado com k graus de liberdade.

Sob premissas de normalidade para u_i, a hipótese nula $\beta_o = \beta_i$, a distribuição será dada pela Equação 13:

$$F_0 = \frac{SQR/gl}{SQE/gl} = \frac{SQR/(k)}{SQE/(n-p)} = \frac{MQ_R}{MQ_E} \quad (13)$$

Assim, sob H_0 , F_0 calculado quando comparado a f, pode-se resumir o teste na tabela 5:

Tabela 5 - Análise de Variância para Teste de Significância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_0
Regressão	SQ_R	k	MQ_R	MQ_R/MQ_E
Erro ou Resíduo	SQ_E	$n - p$	MQ_E	
Total	SQ_T	$n - 1$		

Fonte: Montgomery & Runger, 2012

5.5.2 R^2 E R^2 Ajustado

Outro método possível para se determinar o ajustamento da equação de regressão é o coeficiente de determinação múltiplo R^2. Esse coeficiente mostra a proporção da variação total da variável dependente Y que é explicada pela variável explanatória X, equação 14:

$$R^2 = \frac{SQE}{STQ} = 1 - \frac{SQR}{STQ} = 1 - \frac{\sum \quad \hat{u}_i^2}{\sum \quad \hat{y}_i^2} \quad (14)$$

Vale ressaltar ainda que R^2 é uma função não decorrente do número de variáveis independentes presentes no modelo. Ou seja, quase invariavelmente R^2 aumenta e nunca diminui quando uma variável adicional X for inserida no modelo (GUAJARATI, 2006).

Desta forma, quando encontra-se um R^2 elevado, é possível ter uma interpretação equivocada de novas observações ou estimativas pouco fiáveis do valor esperado de Y. Por isso, esse coeficiente poderá não ser um bom indicador do grau de ajustamento do modelo.

Para se levar em consideração o número de variáveis X presente no modelo, deve-se considerar um coeficiente de determinação alternativo, denominado coeficiente de determinação ajustado que é dado pela Equação 15:

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{\sum \quad \hat{u}_i^2/(n-k)}{\sum \quad \hat{y}_i^2/(n-1)} \tag{15}$$

Onde k é o número de parâmetros do modelo. Além disso, o termo ajustado faz referência ao grau de liberdade associado à soma de quadrados.

Montgomery e Runger (2012) afirmam que o R^2 *e o* $\bar{R}^2$ tem a mesma interpretação quanto ao grau de explicação do modelo, entretanto o $\bar{R}^2$ leva em consideração o grau pela adição de termos que não são realmente úteis, sendo assim um resguardo contra ajuste e adição excessiva de variáveis.

5.5.3 Teste para coeficientes individuais

O objetivo é testar se os valores potenciais de dois coeficientes de regressão são iguais, então tem-se as seguintes hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: \beta_i = \beta_j \\ H_1: \beta_i \neq \beta_j \end{cases}$$

A estatística de teste é dada pela Equação 16:

$$t = \frac{\hat{\beta}_i - \hat{\beta}_j}{\sqrt{var(\hat{\beta}_i) + var(\hat{\beta}_j) - 2cov(\hat{\beta}_i; \hat{\beta}_j)}} \tag{16}$$

Onde:

- $\sqrt{var(\hat{\beta}_i) + var(\hat{\beta}_j) - 2cov(\hat{\beta}_i; \hat{\beta}_j)}$ = desvio padrão da diferença $\hat{\beta}_i - \hat{\beta}_j$.

Se a variável t calculada for maior que o valor crítico de t no nível de significância ao qual deseja para dados graus de liberdade, então se rejeita a hipótese nula, caso contrário não rejeita.

5.5.4 Intervalo de confiança para os erros de especificação

Nos testes de regressão múltipla, faz-se necessário utilizar o intervalo de confiança para avaliar os coeficientes de regressão. A definição do intervalo leva em consideração que os erros $(\in)$ são independentemente distribuídos e $(\in) \sim N(0; \sigma^2)$ (NUNES, 2011).

Considerando a estatística, um intervalo com $100(1-\alpha)\%$ de confiança para os coeficientes da regressão $\beta_{j,}\ j = 0,1,2, \dots, p$ é dado pela Equação 17:

$$\left[\widehat{\beta}_j - t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-p-1\right)} \sqrt{\widehat{\sigma}^2 C_{jj}}\,;\ \widehat{\beta}_j + t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-p-1\right)} \sqrt{\widehat{\sigma}^2 C_{jj}}\right]. \tag{17}$$

5.6. ANÁLISE DE RESÍDUOS

Análise de resíduos é um conjunto de técnicas usadas para investigar e validar a adequabilidade de um modelo de regressão com base nos resíduos encontrados. (HAIR, 2009) Como visto anteriormente, o resíduo (e) é dado pela Equação 18:

$$e = y - \hat{y} \tag{18}$$

Caso o modelo estabelecido seja apropriado, os resíduos encontrados devem refletir as propriedades impostas pelo termo de erro do modelo, dadas pelas suposições abaixo:

$$Y = X\beta + \varepsilon,$$

onde :

$$\varepsilon = \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n \tag{19}$$

Sendo:

- ε_i e ε_j são erros independentes (i≠j);
- $Var(\varepsilon_i) = \sigma^2$ (variância constante);
- $\varepsilon_i \sim N(0; \sigma^2)$ (erro segue uma distribuição normal);
- Modelo linear;
- Não existe outliers influentes.

Dentre as principais técnicas usadas para verificar as suposições descritas acima pode-se destacar as informais e as formais. As técnicas informais ou gráficas podem ser mais subjetivas, pois exige uma percepção visual do pesquisador. Por esse motivo, as técnicas formais ou testes formais são mais indicados para a tomada de decisão. O ideal mesmo é combinar as técnicas disponíveis, tanto formais quanto informais, para que seja dado um diagnóstico correto da suposição do modelo (HAIR, 2009).

Segundo LEVINE *et al.* (2005), ao se estabelecer um modelo de regressão é necessário seguir alguns pressupostos para validação do modelo. Os pressupostos que servem como qualificadores dos ajustes da regressão são a linearidade, homocedasticidade, normalidade dos resíduos, independência dos erros.

O Quadro 6 apresenta um resumo do tipo de gráfico usado e a suposições do modelo:

Quadro 6: Resumo de gráficos de resíduos e suposições

Gráfico dos Resíduos	Suposições Avaliadas
e_i vs $\hat{Y}_i$ e_i vs X_i	Variância Constante Linearidade
e_i vs Variáveis não incluídas	Suficiência das variáveis incluídas.
Probabilidade Normal	Normalidade
e_i vs tempo de coleta	Ausência se autocorrelação temporal.

Fonte: Elaborado pela autora a partir de Hair (2009)

Segundo Hair (2009) a linearidade da relação entre as variáveis dependentes e independentes representa o grau em que a variação na variável dependente é associada com a variável independente. A linearidade das variáveis pode ser analisada por meio de gráficos de resíduos, que indica se existe uma tendência linear do fenômeno.

A homocedasticidade é definida por Hair (2009) como a igualdade de variâncias do termo de erros. Uma das violações mais comuns de um modelo de regressão linear múltipla é

a presença de variâncias desiguais (heterocedasticidade) e o diagnóstico desse caso pode ser feito pelo Teste Levene, que mede a homogeneidade de variâncias para um par de variáveis.

Para o modelo heterocedástico, é necessário testar as seguintes hipóteses, como segue na Equação 20:

$$\begin{cases} Ho: \sigma 1^2 = \sigma 2^2 = \cdots = \sigma K^2 \\ H_1: pelo\ menos\ um\ \sigma i^2 \text{ é } diferente,\ i = 1, \dots, k \end{cases} \quad (20)$$

Levene propôs fazer uma transformação dos dados originais e aplicar aos dados transformados o teste da ANOVA. Equação 21:

$$z_{ij} = \left| x_{ij} - \bar{x}_i \right|, i = 1, \dots, k\ e\ j = 1, \dots, k \quad (21)$$

Onde:

z_{ij}: representa os dados após a transformação;

x_{ij}: representa os dados originais;

$\bar{x}_i$: representa a média do nível i, para os dados originais.

Para o teste de Levene, se p-valor for maior que 5% não rejeitamos a hipótese nula e comprova que há igualdade de variáveis.

A normalidade da distribuição dos termos verifica se os resíduos acompanha a distribuição normal. Segundo Hair (2009) o conjunto mais simples para o conjunto de variáveis independentes na equação é o histograma de resíduos, para uma verificação visual para uma distribuição que se aproxima da normal.

Por fim, a autocorrelação entre os resíduos pode ser examinada através do Teste Durbin-Watson. Conforme Hair (2009), o teste de Durbin-Watson é utilizado para detectar a presença de autocorrelação (dependência) nos resíduos de uma análise de regressão. Este teste é baseado na suposição de que os erros no modelo de regressão são gerados por um processo autoregressivo de primeira ordem, de acordo com a Equação 22:

$$\varepsilon_i = \rho \varepsilon_{i-1} + a_i \quad (22)$$

Em que:

- ε_i: é o termo do erro do modelo na i-ésima observação;
- $a_i \sim N(0, \sigma_a^2)$;
- $\rho(|\rho| < 1)$: é o parâmetro de autocorrelação.

Testamos a presença de autocorrelação por meio das hipóteses:

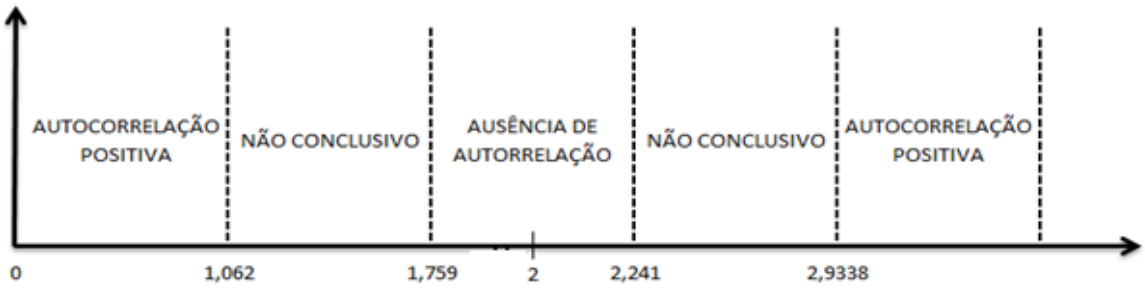
$$\begin{cases} H_0: \rho = 0; \\ H_1: \rho \neq 0; \end{cases}$$

Sendo e_i o resíduo associado à i-ésima observação, temos que a estatística do teste de Durbin-Watson é dada pela Equação 23:

$$dw = \frac{\sum_{i=2}^{n} (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^{n} e_i^2}, \tag{23}$$

Diante disso, pelo valor obtido na estatística Durbin-Watson é possível verificar se o modelo apresenta ausência de autocorrelação, como pode ser observado na Figura 13

Figura 13: Autocorrelação Durbin-Watson



Fonte: Hair (2009)

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas as análises estatísticas que foram utilizados para determinar a equação de regressão linear do problema proposto e os resultados encontrados. À priori, foram coletados dados históricos, referente ao período de janeiro de 2014 a dezembro de 2017, de variáveis que impactam no indicador de eficiência energética e em seguida, analisou-se qual o grau desse impacto na eficiência, através de testes estatísticos.

Sabe-se que a otimização do uso da energia tornou-se algo que transcende as ferrovias e os sistemas de transporte, mas se tornou um fator importante para qualquer setor e para a sociedade atual. No que diz respeito a uma ferrovia a Eficiência Energética pode ser influenciada por diversos fatores, alguns mais controláveis do que outros, mas que precisam ser estudados e entendidos, principalmente os que geram impactos no consumo de combustível (REIS *et al.*, 2013).

Segundo Murakami *et al.* (2009) uma operação de trem efetiva corresponde aquela que é capaz de reduzir o consumo de combustível. Decisões de tamanho de trem, alocação de cada modelo de locomotiva e vagões, considerando velocidade, perfil e volume transportado, são fundamentais para um melhor aproveitamento da potência da composição.

Dentre as inúmeras variáveis que impactam na Eficiência Energética, optou-se por utilizar um grupo de variáveis quantitativas, como na Figura 10, que apresentaram forte correlação com o indicador. A relação entre as variáveis candidatas ao modelo e aquelas que impactam ns EE e foram apresentadas na Figura 10, pode ser verificada no Quadro 7.

Quadro 7: Descrição das variáveis

Variáveis candidatas ao modelo	**Descrição**	**Variáveis que impactam na EE (Figura 10)**
TKB Total	Corresponde a quantidade de TKB total produzida por todos os trens que circularam em um dado período de tempo	Carga por distância percorrida
TKB G10	Corresponde a quantidade de TKB produzida pelas locomotivas do grupo G10 (locomotivas GE-AC44MIL) que circularam em um dado período de tempo	Carga por distância percorrida
TKB G9	Corresponde a quantidade de TKB produzida pelas locomotivas do grupo G9 (locomotivas GE-Dash Nine) que circularam em um dado período de tempo	Carga por distância percorrida
TKB Outros	Corresponde a quantidade de TKB produzida pelas demais locomotivas em um dado período de tempo	Carga por distância percorrida
TU Real Total	Indica a quantidade de tonelada útil transportada por trens em um dado período de tempo	Carga transportada
TU/tabela	Indica a quantidade de tonelada útil de minério transportada por um trem. Essa variável foi ponderada pela representatividade dos principais clientes de minério de ferro exportação.	Carregamento médio de vagões
Transit Time Carregado	Caracteriza-se por uma das 12 etapas do ciclo de circulação do trem. Representa o tempo médio gasto por um trem para realizar um ciclo completo, desde o pátio de carga (após o carregamento) até o pátio de descarga (antes de descarregar)	Tempo de circulação
Fila do Carregado	Caracteriza-se por uma das 12 etapas do ciclo de circulação do trem. Representa o tempo gasto por um trem parado em filas, desde o pátio de carregamento (após o carregamento) até o pátio de descarga (antes de descarregamento)	Quantidade e tempo de paradas
Ciclo	Corresponde ao tempo gasto por um trem para realizar um ciclo completo de operação, indo desde o pátio de carregamento até o pátio de descarregamento.	Ciclo
Disp. Total	Corresponde ao total de locomotivas de todos os grupos que estavam a disposição da operação para serem utilizadas em trens.	Disponibilidade de locomotivas
Disp. G10	Corresponde ao total de locomotivas de todos os grupos que estavam a disposição da operação para serem utilizadas em trens.	Disponibilidade de locomotivas
Disp. G9	Corresponde ao total de locomotivas de todos os grupos que estavam a disposição da operação para serem utilizadas em trens.	Disponibilidade de locomotivas
Disp. Outros	Corresponde ao total de locomotivas de todos os grupos que estavam a disposição da operação para serem utilizadas em trens.	Disponibilidade de locomotivas
Condução	Corresponde o percentual global de melhoria em diesel gerado pela condução de trens dos maquinistas, sendo o consumo de diesel realizado, comparado ao esperado para determinado trecho.	Condução (trecho, padrões e treinamentos)
Desligamento	Corresponde ao percentual de oportunidades de desligamento das locomotivas em trechos que possibilitam tal exercício, pátios e oficinas.	Desligamento manual e automático
Cascateamento	Corresponde ao percentual de locomotivas do grupo G10 e G9 que são cascateadas para serem utilizadas no transporte de carga geral, quando não utilizadas para o transporte do Heavy Haul.	Cascateamento e cascateamento prioritário
Cascateamento Prioritário	Corresponde ao percentual de locomotivas do grupo G10 e G9 que são cascateadas para serem utilizadas no transporte de alguns grupos prioritários de carga geral, quando não utilizadas para o transporte do Heavy Haul.	Cascateamento e cascateamento prioritário

Fonte: Elaborado pela autora

Vale ressaltar que existem outras variáveis cuja correlação com a Eficiência Energética é evidente, como por exemplo, o cascateamento de locomotivas, geral e prioritário, condução do maquinista em redução de diesel e desligamento de locomotivas. Entretanto, por serem frentes recentes de trabalho houve uma dificuldade em mensurar e obter dados históricos dessas variáveis, o que se tornou uma limitação na utilização enquanto candidatas a compor o modelo.

Com relação a etapa de coleta de dados pode-se dizer que é a atividade a qual se utiliza os instrumentos elaborados e técnicas selecionadas, de modo a obter informações relevantes para o trabalho (MARCONI; LAKATOS, 2010).

Diante disso, para proposição do modelo de regressão linear, utilizou-se nesse trabalho dados mensais das variáveis citadas no Quadro 7, compreendidos no período entre janeiro de 2014 até dezembro de 2017, com exceção das variáveis cascateamento de locomotivas, condução do maquinista em redução de diesel e desligamento de locomotivas, cuja a base de dados obtidas é referente ao período de janeiro de 2016 até dezembro de 2017. O *software* utilizado foi o SPSS, versão 10.

Importante destacar ainda que para melhor padronização dos dados, utilizou-se uma transformada logarítmica aplicada a todos os dados.

6.1. DETERMINAÇÃO DO MODELO DE REGRESSÃO

A estatística é tida como a ciência que lida com a coleta, apresentação, análise e uso dos dados, com objetivo de tomada de decisões, resolução de problemas e planejamento de produtos e processos. A utilização de métodos estatísticos auxilia no processo decisório e conclusivo no campo científico, mesmo com a presença de incertezas e variabilidade dos dados (MONTGOMERY; RUNGER, 2012; WALPOLE *et al* 2012).

Diante do exposto, a aplicação de técnicas estatísticas contribuiu para avaliar o comportamento das amostras de dados e suas inter-relações, com o intuito de compreender melhor os dados, facilitar as análises e identificar possíveis erros.

De posse das análises realizadas, gerou-se alguns modelos de regressão linear com base em um conjunto de variáveis candidatas a compor a equação linear, com o intuito de encontrar o melhor modelo que descreva quantitativamente o indicador de eficiência energética.

- **Modelo I:**

Inicialmente, o modelo gerado contempla as variáveis elegidas pela junção das análises estatísticas e exploratórias, objetivando uma análise mais completa, visto a complexidade do indicador estudado. O modelo gerado inclui todas as variáveis analisadas como preditoras, à saber, Disp_Outros, TTC, VCC, Disp_G9, Disp_G10, TKB_G10, TKB_G9, Ciclo, TU_Tab, Disp_Total. O resultado obtido pela regressão é expresso pela Figura 14.

Figura 14: Modelo de Regressão Linear (I)

EQUAÇÃO MATEMÁTICA:

EE= 11,696 - 0,538 * TKB_G10 - 0,025 * TKB_G9 - 0,109 * TTC -0.038* VCC + 0,206 * Ciclo - 0,477* TU_Tab - 6,038 * Disp_Total + 1,695 * Disp_G10 + 0,748 * Disp_G9 + 3,788 * Disp_Outros.

S = 96,2%	R-Sq = 92,6%	R-Sq (adj) = 90,4%	Std. Error = 2,97%

Analysis of Variance	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	0,373	10	0,037	42,354	,000[d]
Residual Error	0,03	34	0,001		
TOTAL	0,403	44			

	B	Std. Error	Beta	t	Sig.	Correlations
(Constant)	11,696	4,402		2,657	0,012	
TKB_G10	-0,538	0,206	-0,368	-2,609	0,013	-0,906
TKB_G9	-0,025	0,066	-0,06	-0,383	0,704	0,848
TTC	-0,109	0,266	-0,032	-0,411	0,683	0,631
VCC	-0,038	0,064	-0,056	-0,592	0,558	0,618
Ciclo	0,206	0,527	0,07	0,391	0,698	0,841
TU_Tab	-0,477	0,352	-0,26	-1,355	0,184	-0,873
Disp_Total	-6,038	6,573	-1,727	-0,919	0,365	0,67
Disp_G10	1,695	2,27	0,56	0,746	0,461	-0,858
Disp_G9	0,748	0,751	0,482	0,996	0,326	0,503
Disp_Outros	3,788	3,331	2,154	1,137	0,263	0,838

Fonte: Elaborado pela autora com base em saídas do teste

Pela análise do modelo gerado, é possível concluir que pelo valor da soma dos quadrados (R^2), o modelo possui grande nível de adequação, já que 92,6% da variabilidade do indicador de eficiência energética podem ser explicados pelas variáveis independentes do modelo. E o R^2 ajustado de 90,4% e o teste da Distribuição F de 42,35 também evidenciam a adequabilidade do modelo.

Contudo, quando se analisa individualmente as variáveis preditoras do modelo, verifica-se que nem todas as variáveis que compuseram o modelo são significativas, como pode ser observado no campo "Sig. de cada variável independente". Desta forma, essas variáveis não deveriam compor o modelo, pois pouco ajudam a explicar a variável de interesse.

O teste t também corrobora para essa afirmação, já que os valores da estatística t de cada variável independente é menor que 2 em módulo.

Assim, o modelo I não descreve com boa adequação a variável de eficiência energética.

.

- **Modelo II:**

De posse das saídas do modelo I, gerou-se um novo modelo, agora com a estimação *stepwise*, com o intuito de maximizar a variância explicada incrementalmente em cada passo da construção do modelo. O resultado obtido pela regressão linear múltipla com estimação *stepwise*, tendo as variáveis de TKB_G10, TU_tabela e Disponibilidade de outros como preditoras é apresentado abaixo na Figura 15:

Figura 15: Modelo de Regressão Linear (II)

EQUAÇÃO MATEMÁTICA:

EE= 8,46 - 0,573 * TKB_G10 + 0,665 * Disp_Outros - 0,518 * TU_Tab

S = 95,9%	R-Sq = 91,9%	R-Sq (adj) = 91,3%	Std. Error = 2,82%

Analysis of Variance	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	0,37	3	0,123	155,542	,000[d]
Residual Error	0,033	41	0,001		
TOTAL	0,403	44			

Durbin-Watson statistic = 1,927

	B	Std. Error	Beta	t	Sig.	Correlations
	8,46	1,188		7,12	0	
TKB_G10	-0,573	0,145	-0,392	-3,967	0	-0,906
Disp_Outros	0,665	0,11	0,379	6,037	0	0,838
TU_Tab	-0,518	0,17	-0,282	-3,041	0,004	-0,873

Fonte: Elaborado pela autora com base em saídas do teste

O modelo gerado apresenta grande nível de adequação, pois pela soma dos quadrados (R^2) foi de 91,9%, ou seja, 91,9% da variabilidade da eficiência energética de uma empresa ferroviária de carga é explicada pela interação das variáveis que compõe o modelo. Essa interpretação é corroborada pelo R^2 ajustado de 91,3%, que possui a mesma interpretação do R^2, porém com maior rigor das variáveis preditoras.

Além disso, percebe-se que o modelo é altamente aceito pelo bom ajuste evidenciado através do Teste de distribuição F de 155,54. Conforme Costa *et al.* (2006), o método empregado para se avaliar quantitativamente a qualidade do ajuste de um modelo é a análise de variância (ANOVA). Pelo Teste ANOVA, rejeitou-se a hipótese de insignificância do modelo com P-valor de 0,00, enquanto para as variáveis individuais, rejeitou-se com 95% de significância a hipótese de $\beta=0$.

A Tabela 6 abaixo apresentam os coeficientes relacionados à correlação e colinearidade:

Tabela 6: Coeficientes relacionados à correlação e colinearidade

Model	Correlations		Collinearity Statistics	
	Partial	Part	Tolerance	VIF
(Constant)				
TKB_G10	-0,527	-0,176	0,201	4,968
Disp_Outros	0,686	0,268	0,501	1,996
TU_Tab	-0,429	-0,135	0,229	4,375

Fonte: Fonte: Elaborado pela autora com base em saídas do teste

Segundo Hair (2009), a tolerância é uma medida direta da multicolinearidade, a qual é definida como a quantidade da variabilidade da variável dependente selecionada não explicada pelas outras variáveis independentes. Uma segunda medida de multicolinearidade é o fator de inflação da variável (VIF), o qual é calculado simplesmente como o inverso do valor de tolerância.

Hair (2009) ainda apresenta uma regra para análise do VIF, como na Quadro 8 abaixo:

Quadro 8: Fator de Inflação da Variável (VIF)

VIF	ANÁLISE
Até 1	Sem multicolinearidade
De 1 até 10	Com multicolinearidade aceitável
Acima de 10	Com multicolinearidade problemática

Fonte: Elaborado pela autora a partir de Hair (2009)

De posse dessas informações é possível concluir que o modelo II tem uma multicolinearidade dentro da faixa do aceitável e valores de tolerância bem baixos, contribuindo para a suposição de boa adequabilidade do modelo.

Importante destacar ainda que apesar de existirem outras variáveis que apresentaram alta correlação com a Eficiência Energética, as mesmas não entraram no modelo por problemas de multicolinearidade, ou seja, a entrada de tal variável não melhora o ajuste do modelo, mas acaba por provocar o aumento do p-valor de outras variáveis a níveis próximos ou superiores ao limite de aceitação.

- **Análise das variáveis do Modelo II**

Outro ponto que deve ser levado em consideração é a correlação entre as variáveis que compuseram o modelo de regressão linear apresentado no modelo II.

Segundo Barbetta *et al.* (2004), o coeficiente de correlação de Pearson (r) ou coeficiente de correlação mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas. É um índice adimensional com valores situados ente -1,0 e 1.0 inclusive, que reflete a intensidade de uma relação linear entre dois conjuntos de dados, podendo ser "+" ou "-" (BARBETTA *et al.*, 2004).

Dantas (1998) ainda propõe o grau da correlação entre duas variáveis a partir do coeficiente encontrado, conforme segue no Quadro 9.

Quadro 9: Classificação do coeficiente de correlação

COEFICIENTE	CORRELAÇÃO
$R = 0$	Nula
$0 < R \leq 0{,}30$	Fraca
$0{,}30 < R \leq 0{,}70$	Média
$0{,}70 < R \leq 0{,}90$	Forte
$0{,}90 < R \leq 0{,}99$	Fortíssima
$R = 1$	Perfeita

Fonte: adaptado de Dantas (1998)

A Tabela 7 apresenta a correlação individual de cada variável candidata com o indicador de eficiência energética. Por meio de uma análise é possível perceber que todas as variáveis candidatas a compor o modelo possuem correlações de fraca à forte com o indicador, entretanto, esses valores de correlação tenderão a se alterar pela interação com outras variáveis quando inseridas no modelo.

Tabela 7: Correlação entre as variáveis candidatas a compor o modelo

	Ef_En	TKB_G10	TKB_G9	TTC	VCC	Ciclo	TU_Tab	Disp_Total	Disp_G10	Disp_G9	Disp_Outros
Ef_En	1,000	-0,906	0,848	0,631	0,618	0,841	-0,873	0,670	-0,858	0,503	0,838
TKB_G10	-0,906	1,000	-0,744	-0,728	-0,622	-0,858	0,877	-0,480	0,887	-0,340	-0,702
TKB_G9	0,848	-0,744	1,000	0,462	0,525	0,740	-0,755	0,831	-0,729	0,621	0,092
TTC	0,631	-0,728	0,462	1,000	0,435	0,689	-0,684	0,210	-0,667	0,120	0,417
VCC	0,618	-0,622	0,525	0,435	1,000	0,784	-0,783	0,300	-0,648	0,257	0,458
Ciclo	0,841	-0,858	0,740	0,689	0,784	1,000	-0,942	0,471	-0,798	0,486	0,625
TU_Tab	-0,873	0,877	-0,755	-0,684	-0,783	-0,942	1,000	-0,462	0,877	-0,455	-0,652
Disp_Total	0,670	-0,480	0,831	0,210	0,300	0,471	-0,462	1,000	-0,382	0,746	0,926
Disp_G10	-0,858	0,887	-0,729	-0,667	-0,648	-0,798	0,877	-0,382	1,000	-0,272	-0,667
Disp_G9	0,503	-0,340	0,621	0,120	0,257	0,486	-0,455	0,746	-0,272	1,000	0,575
Disp_Outros	0,838	-0,702	0,916	0,417	0,458	0,625	-0,652	0,926	-0,667	0,575	1,000

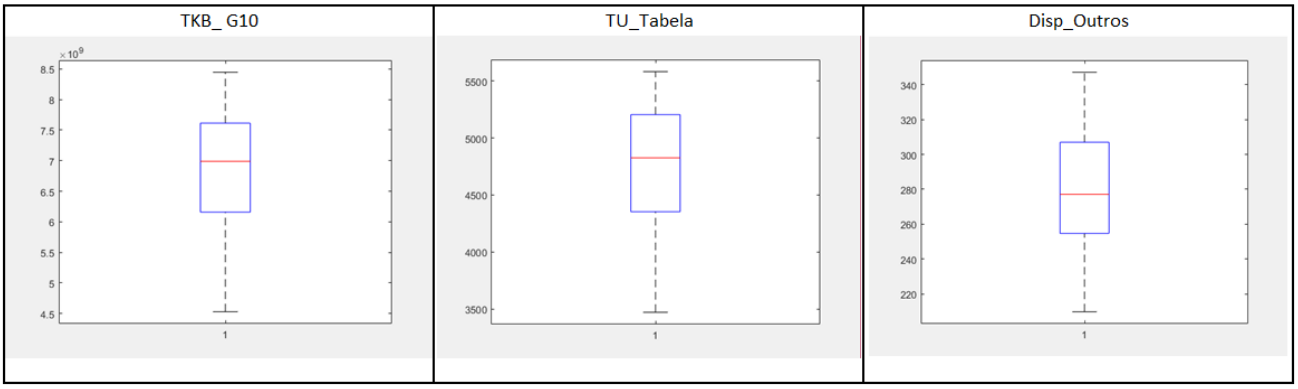
Fonte: Elaborado pela autora

Importante compreender ainda a diferença entre o conjunto de dados utilizados. Segundo Cooper e Schindler (2003) o Diagrama de Extremos-e-Quartis permite analisar a

distribuição dos valores de cada variável, informando o resumo de cinco números: mediana, quartis superiores e inferiores e maior e menor observação.

Quando se aplica essa ferramenta estatística nos dados, observa-se que as variáveis que irão compor o modelo (TKB G10, TU/Tabela e Disponibilidade de Outros), apesar de não apresentarem *outliers*, elas têm níveis de variância consideráveis e leve assimetria, conforme é perceptível na Figura 16.

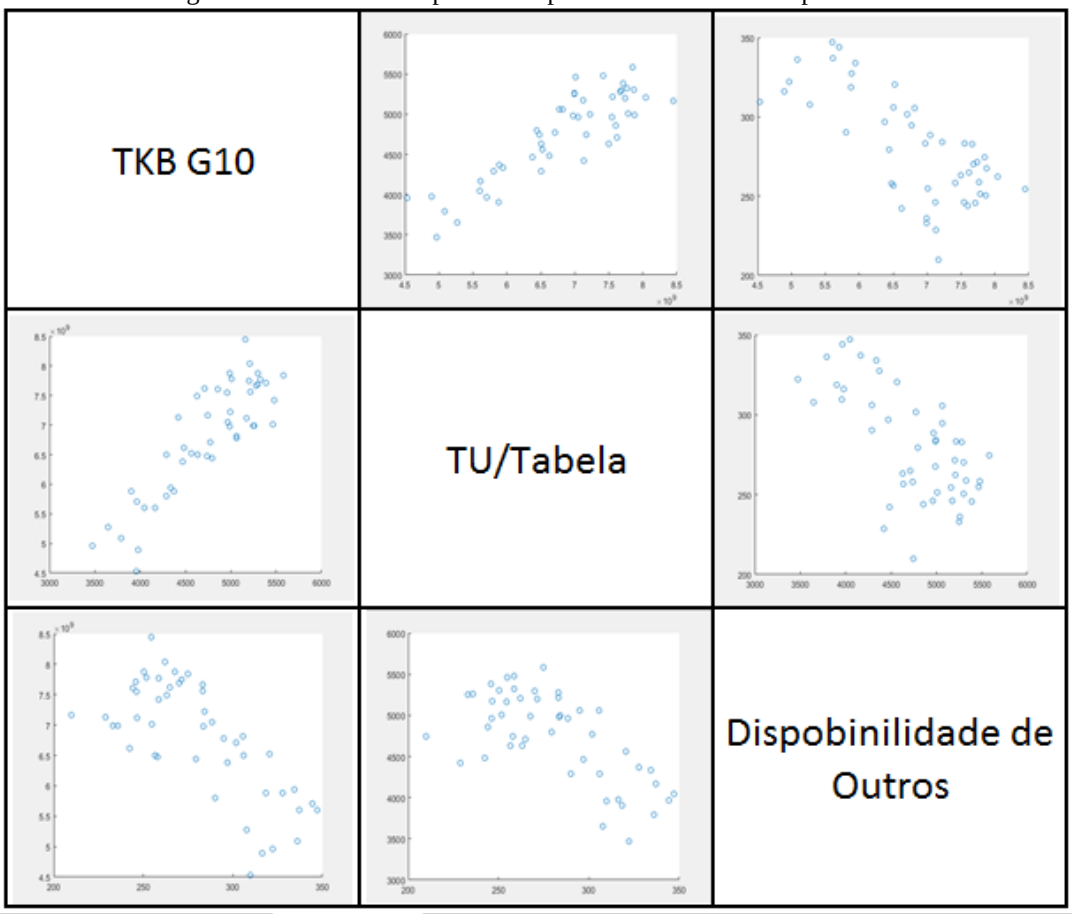
Figura 16: Box plot das variáveis que irão compor o modelo



Fonte: Elaborado pela autora com base em saídas do teste

Para Hair (2009) a inexistência de correlação entre as variáveis que são ditas independentes é um fundamental para atingir um modelo plausível. Assim, neste trabalho utilizou-se a ferramenta de gráfico de dispersão em pares para verificar qual o comportamento dos dados, como pode ser visualizado na Figura 17:

Figura 17: Gráfico de dispersão em pares das variáveis independentes



Fonte: Elaborado pela autora

É possível inferir que a variável de TKB_G10 e a TU/Tabela tem uma tendência de linearidade positiva, ou seja, a medida que aumenta-se a TKB_G10, aumenta-se também a quantidade de tonelada útil por trem. Já a TKB_G10 e Disponibilidade de Outros apresenta uma tendência de linearidade negativa, bem como TU/Tabela e Disponibilidade de Outros. De forma análoga, quanto maior a quantidade de TKB transportada por locomotivas G10, menor a necessidade de locomotivas de grupos menores. O mesmo ocorre se aumentar a tonelada útil por tabela.

Para completar ainda mais a análise, verificou-se a correlação entre as variáveis independentes. A Tabela 8 confirma a correlação considerável entre as variáveis, o que vem corroborar os resultados obtidos anteriormente.

Tabela 8: Tabela de correlação entre as variáveis “independentes”

	TKB_G10	*TU/Tabela*	*Disponib_Outros*
TKB_G10	1		
TU/Tabela	0,8690	1	
Disponib_Outros	- 0,7108	- 0,6588	1

Fonte: Elaborado pela autora com base em saídas do teste

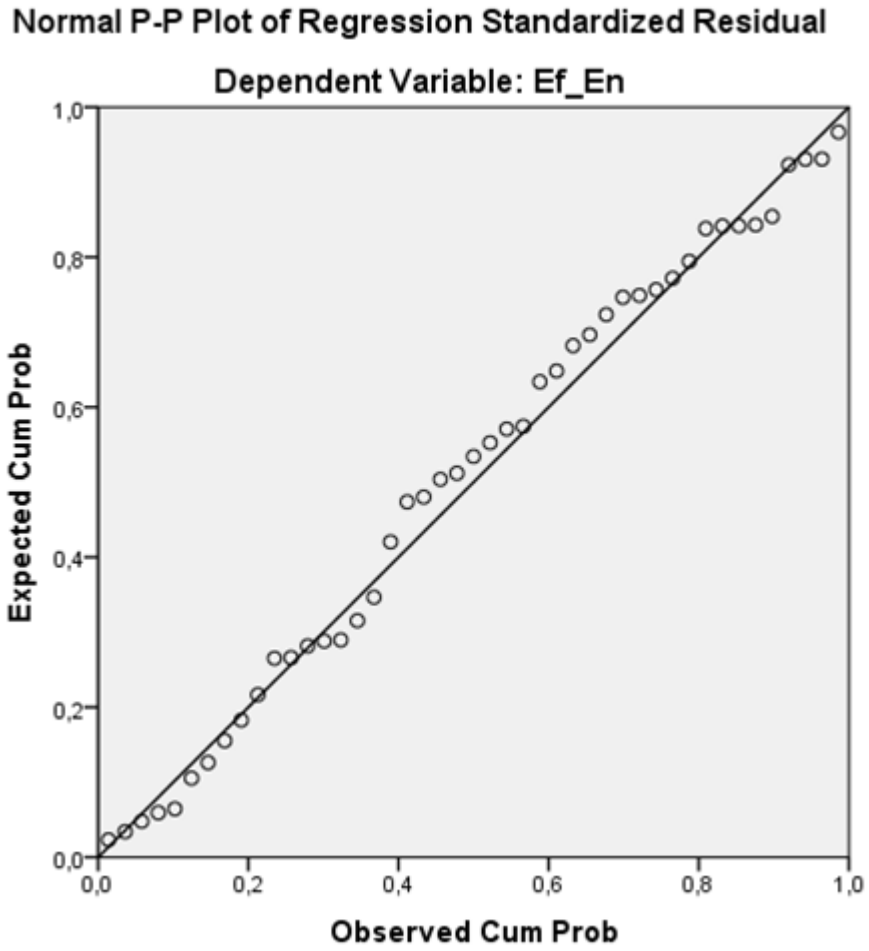
A seguir será feita a análise dos resíduos dado o modelo obtido tendo como variáveis independetes TKB_G10, TU/tabela e Disponib_Outros.

- **Análise dos resíduos do Modelo II**

A análise dos resíduos, seja com gráficos de resíduos ou testes estatísticos, fornece um conjunto de ferramentas analíticas para o exame da adequação do modelo de regressão. Os pressupostos que servem, como qualificadores dos ajustes da regressão são a linearidade, homocedasticidade, normalidade dos resíduos e independência dos erros.

Diante disso, para este modelo observou-se que os resíduos gerados são normalmente distribuídos, pois no Gráfico de Probabilidade, Figura 18, os pontos estão seguindo com boa adequação a reta, atendendo assim o princípio de normalidade.

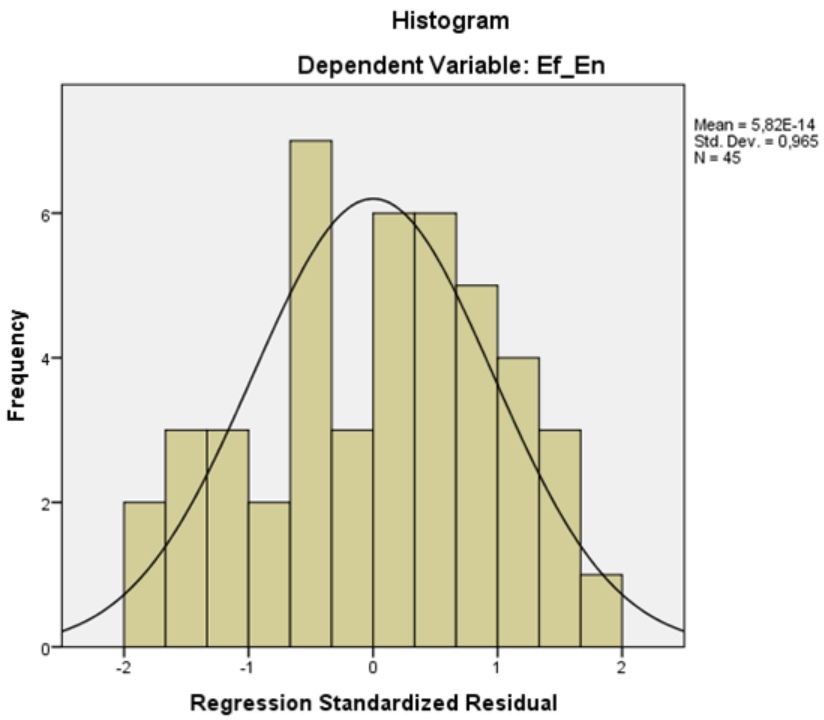
Figura 18: Teste de normalidade dos resíduos



Fonte: Elaborado pela autora com base em saídas do teste

A normalidade dos resíduos também pode ser comprovada pelo histograma, Figura 19, visto que de forma geral, apresenta uma distribuição equilibrada, apesar da concentração minimamente para o lado direito e evidente pico ocasionado pelo acúmulo de valores nessa faixa, mas ainda assim dando a ideia de normalidade.

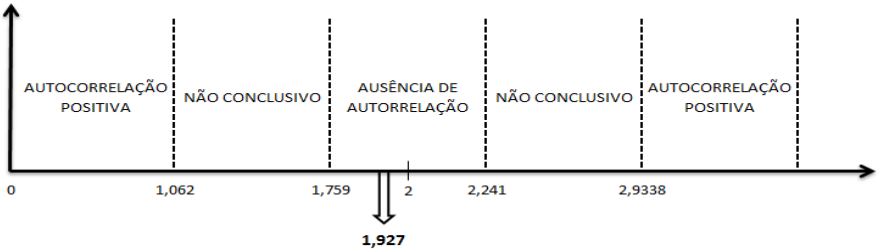
Figura 19: Histograma dos resíduos



Fonte: Elaborado pela autora com base em saídas do teste

Já a autocorrelação entre os resíduos foi examinada através do Teste Durbin-Watson. Conforme LEVINE *et al.* (2005), quando os resíduos sucessivos são positivamente autocorrelacionados, o valor da estatística D irá se aproximar de zero. Se os resíduos não forem autocorrelacionados, o valor de D estará próximo de dois. Se existir autocorrelação negativa, o que é raro, D será maior que dois e poderia se aproximar do seu valor máximo, sendo igual a quatro. No modelo gerado, o valor obtido no teste D foi de 1,927, que quando comparado na tabela Durbin-Watson indica ausência de autocorrelação, conforme a Figura 20.

Figura 20: Autocorrelação Durbin-Watson



Fonte: Elaborado pela autora

Para verificar a presença de variâncias desiguais, realizou-se o Teste de Levene e os resultados são apresentados na Tabela 9:

Tabela 9: Teste da Variância

Teste de Variância			
Informação	**TKB_G10**	**TU_tabela**	**Disp_Outros**
Levene (estatística do teste)	0,370	1,027	1,085
Graus de Liberdade	6	6	6
P-valor	0,894	0,422	0,387

Fonte: Elaborado pela autora com base em saídas do teste

Verificamos que o p-valor do teste é maior que o nível de significância escolhido de 5%, portanto não rejeitamos a hipótese de igualdade das variâncias.

Satisfeitas todas as premissas e pressupostos do modelo de regressão linear, o modelo desenvolvido é valido e de boa qualidade, do ponto de vista matemático, sendo viável para explicar e controlar o indicador de eficiência energética. Entretanto, o modelo gerado não se adequa bem à previsão do indicador, pois os valores das variáveis usadas estão sujeitos a sazonalidade e variação entre o planejado e o real.

- **Modelo III:**

De posse dos resultados do modelo II, gerou-se um novo modelo obrigando a próxima variável candidata a entrar no modelo pela estimação *stepwise*, *VCC*, com correlação parcial de -0,122, a compor o modelo, visando identificar qual o impacto no modelo de regressão. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 21.

Figura 21: Modelo de Regressão Linear (III)

EQUAÇÃO MATEMÁTICA:

EE= 8,63 - 0,552 * TKB_G10 + 0,662 * Disp_Outros - 0,626* TU_Tab - 0,039 * VCC

S = 95,9%	R-Sq = 92,0%	R-Sq (adj) = 91,2%	Std. Error = 2,83%

Analysis of Variance	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	0,37	4	0,93	155,686	,000[d]
Residual Error	0,032	40	0,001		
TOTAL	0,403	44			

Durbin-Watson statistic = 1,851

	B	Std. Error	Beta	t	Sig.	Correlations
	8,629	1,214		7,111	0	
TKB_G10	-0,552	0,148	-0,378	-3,73	0,001	-0,906
Disp_Outros	0,662	0,111	0,377	5,975	0	0,838
TU_Tab	-0,626	0,221	-0,341	-2,84	0,007	-0,873
VCC	-0,039	0,05	-0,057	-0,778	0,441	0,618

Fonte: Elaborado pela autora com base em saídas do teste

Pela análise dos resultados é possível concluir que a entrada da variável VCC no modelo revela que o ajuste geral do modelo diminui. Ao contrário do coeficiente de determinação que aumenta (de 0,919 para 0,920) por causa da variável independente incluída, o R^2 ajustado diminui levemente (de 0,913 para 0,912) o que indica que a variável acrescentada é não-significante para a equação de regressão e apresenta pouco poder explicativo da parte que falta para justificar a variável de eficiência energética.

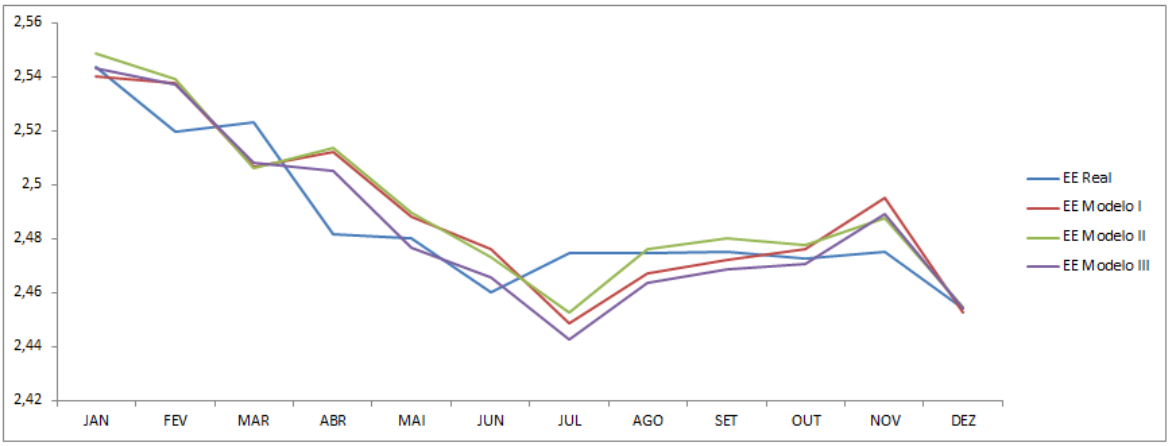
Outra indicação do ajuste geral mais pobre do modelo III é o aumento no erro padrão da estimativa (SEE), de 0,0282 para 0,0283, o que demonstra que o R^2 geral não deve ser o único critério para a precisão preditiva, pois pode ser influenciado por vários fatores, entre os quais o número de variáveis independentes.

Desta forma, apesar da entrada forçada da variável VCC não ter impactos substanciais de multicolinearidade sobre as outras variáveis no modelo *stepwise*, é notório que o modelo III não supera o modelo II em níveis de explicação da variável interessada, pois a significância da estatística t é 0,441, superior ao limite aceitável de 5%.

- **Comparação entre os modelos**

A comparação entre os modelos é feita via quantificação da aderência aos dados recentes da eficiência energética no horizonte de 4 anos. A melhor aderência do novo modelo é evidenciada na Figura 22, cujos os maiores pontos de descolamento são explicados por meses de efeito de influências externas, que altera a produção, circulação e consequentemente a EE, impactando assim, na capacidade de predição das variáveis independentes de ambos.

Figura 22: Gráfico da comparação da EE conforme os modelos gerados



Fonte: Elaborado pela autora com base em saídas do teste

Por fim, a equação que melhor descreve o indicador de eficiência energética é dada pela Equação 24, gerada pelo Modelo II:

$$EE = 8{,}46 - 0{,}573 * TKB_G10 + 0{,}665 * Disp_Outros - 0{,}518 * TU_Tab \quad (24)$$

7. CONCLUSÃO

A pesquisa desenvolvida tem como objetivo central verificar qual a importância do modal ferroviário no contexto do transporte de carga no Brasil, bem como propor um novo modelo de equação matemática que descreva o indicador de eficiência energética de uma empresa ferroviária de carga, por meio de regressão linear múltipla.

Quanto ao panorama do transporte de carga no Brasil, verificou-se que o modal ferroviário é capaz de transportar grandes volumes, mesmo em longas distâncias, à preços competitivos. Além disso, a abrangência da infraestrutura desse modal permite o desenvolvimento de regiões e melhoria do fluxo de mercadorias no país.

Já em relação ao indicador de eficiência energética, o mesmo está diretamente relacionado ao consumo de combustível gasto para transportar um determinado volume de carga, sendo o diesel um dos maiores custos operacional das ferrovias. Diante disso, a busca constante por uma melhor eficiência energética permite às empresas aumentar a competitividade, através da redução significativa nos custos de fretes.

Após os resultados obtidos e por meio das análises estatísticas realizadas, foi possível avaliar que a eficiência energética está relacionada ao volume de carga transportada por locomotivas mais eficientes, modelo GE - AC44MIL, pela disponibilidade de locomotivas e pela carga útil transportada por cada trem.

Vale ressaltar que as variáveis preditoras que compuseram o modelo de regressão linear apresentaram grande correlação parcial com o indicador de eficiência energética e grande potencial para explicá-lo após interações lineares, sendo as mais relevantes para a equação e permitindo um bom ajuste do modelo.

Outro ponto observado foi em relação aos coeficientes β das variáveis independentes da equação resultante. Foi possível concluir que a variação do volume de carga transportado por locomotivas do grupo 10 tem relação linear negativa com a eficiência energética, ou seja, um maior volume transportado por locomotivas do grupo 10, menor valor do indicador. O mesmo ocorre para o volume de carga transportado por cada composição. Já a disponibilidade de locomotivas tem relação negativa com o indicador em estudo, sendo que o aumento ocasiona maior valor da eficiência energética.

O modelo gerado apresentou um R^2 ajustado significativo para explicar a variável de interesse e as relações das variáveis independentes são condizentes com as análises qualitativas, o que indica que o modelo matemático descreve de forma plausível o que é realizado na prática.

Por fim, é possível afirmar que o trabalho desenvolvido cumpriu com o objetivo proposto, desenvolvendo um novo modelo de regressão linear para descrever o indicador de eficiência energética, com grande nível de adequação matemática e grau de explicação dos padrões de operação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE M. C. **Indicadores de Desempenho no Transporte Ferroviário de Carga, 2006**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

ALVARENGA, A. C. NOVAES, A. G. N. **Logística Aplicada**: Suprimento e Distribuição Física. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2000.

ANTF – Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários. Disponível em: <www.antf.org.br>. Acesso em 30 set 2017.

ANTT - Agencia Nacional de Transportes Terrestres**. Evolução do Transporte Ferroviário de Cargas, 2017**. Disponível em: < www.antt.gov.br >. Acesso em: 30 set. 2017.

___. **Evolução do Transporte Ferroviário de Cargas, 2015**. Disponível em: < www.antt.gov.br >. Acesso em: 30 set. 2017.

ANUT - Associação Nacional dos Usuários do Transporte de Cargas. Transporte - **Desafio ao Crescimento do Agronegócio Brasileiro. Abril/2004**. Disponível em: <www.anut.org.br> Acesso em 30 set. 2017.

BALLOU, Ronald H. **Gerenciando a Cadeia de Suprimentos**: Planejamento, Organização e Logística Empresarial. Porto Alegre: Bookman, 2001.

BARBETTA, Pedro Alberto. REIS, Marcelo Menezes. BORNIA, Antonio Cezar. **Estatística para Cursos de Engenharia e Informática**. São Paulo: Atlas, 2004.

BUSTAMANTE, J. C. **Capacidade dos Modos de Transporte**. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1999.

CAIXETA FILHO, J. V. MARTINS, R. S. **Gestão Logística do Transporte de Cargas**. São Paulo: Atlas, 2001.

CAMARGO, Leonidas Lopes de. **Uso de indicadores da qualidade para o gerenciamento estratégico de empresas do ramo comercial.** 2000. 109p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

CNT - Confederação Nacional de Transportes. **Pesquisa CNT de Ferrovias,** 2015. Disponível em: < www.issuu.com >. Acesso em: 30 set. 2017.

___. **Pesquisa Aquaviária**: Relatório Gerencial. Brasília. Confederação Nacional do Transporte, 2016. Disponível em: < www.cnt.gov.br >. Acesso em: 30 set. 2017.

___. **Pesquisa Ferroviária**: Relatório Gerencial. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2016. Disponível em: < www.cnt.gov.br >. Acesso em: 30 set. 2017.

___. **Pesquisa Rodoviária**: Relatório Gerencial. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2016. Disponível em: < www.cnt.gov.br >. Acesso em: 30 set. 2017.

___. **O Sistema Ferroviário Brasileiro**. 2013. Disponível em: < www.cnt.gov.br >. Acesso em: 24 nov. 2017

CNT/COPPEAD. **Transporte de cargas no Brasil**: Ameaças e Oportunidades para o Desenvolvimento do País, 2002. Disponível em: < www.cnt.gov.br >. Acesso em: 30 set. 2017.

___. **Transporte de cargas no Brasil**: Ameaças e Oportunidades para o Desenvolvimento do País, 2005. Disponível em: < www.cnt.gov.br >. Acesso em: 30 set. 2017.

___. **Perspectivas para Logística Brasileira**. Publicações CEL, COPPEAD, UFRJ, abril de 2001. Disponível em: < www.cnt.gov.br >. Acesso em 20 nov. 2017.

___. **Transporte de cargas no Brasil:** Ameaças e Oportunidades para o Desenvolvimento do País, 2002. Disponível em: < www.cnt.gov.br >. Acesso em: 09 jun. 2008.

COELI, C. C. M. **Análise da demanda por transporte ferroviário: o caso do transporte de grãos e farelo de soja na ferro-norte**. Dissertação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto COPPEAD de Administração, 2004.

COOPER, D. R. SCHINDLER, P. S. **Métodos de Pesquisa em Administração.** Porto Alegre: Bookman, 2003

CORRAR, L. J. PAULO, E. DIAS FILHO, J. M**. Análise multivariada para os cursos de Administração, Ciências Contábeis e Economia**. São Paulo: Atlas, 2007.
COSTA, F. G. et al. **Influência do Transporte no uso da Terra:** o caso da Logística de Movimentação de Grãos e Insumos na Amazônia Legal. In: CAIXETA-FILHO, J.V.

DANTAS, R. A. **Engenharia de Avaliações:** Uma Introdução à Metodologia Científica. 1. Ed.2. Tiragem. São Paulo: Pini, 1998.

DNIT – Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. **Anuário Estatístico Rodoviário**. Brasília, 2006. Disponível em: < www.dnit.gov.br >. Acesso em 30 set. 2017.

FILHO, E. R. **Administração de Material e Patrimônio**. IESDE, Curitiba, 2012.

FLEURY, P. F. **Ferrovias Brasileiras – Dez Anos de Privatização**. Centro de Estudos em Logística – COPPEAD/UFRJ – Revista Tecnologística – Rio de Janeiro, 2007.

GUJARATI, D**. Econometria Básica**. Campus, Rio de Janeiro (2006**)**

HAIR, J. ANDERSON, R. TATHAM, R. BLACK, W. **Análise Multivariada de Dados**. Bookman, Porto Alegre, 2009.

JORDÃO, L. F. RIBEIRO. **Otimização da Eficiência Energética no Corredor Centro da FCA: Uma Análise da Redução de Custo Operacional no Trecho.** Belo Horizonte, 2006. Monografia de Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (2006)

LEVINE, D.M., BERENSON M. L., STEPHAN D. **Estatística: teoria e aplicações.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2005.

MALINVERNI, Cláudia. **Cabotagem Início da Retomada. Revista Tecnologística**. Publicare Editora Ltda, São Paulo, 2003.

MARCONI, M. A. LAKATOS, E. M.. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 7.ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MAROCO, J. **Análise Estatística Com Utilização do SPSS**. 2. ed. Lisboa: Edições Sílabo, 2003.

MIGUEL, P. A. C. (org.). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MONTGOMERY, D. RUNGER G. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros.** LTC, São Paulo, 2003.

MURAKAMI, K. HAGA, I. YAMASHITA, O. and NAKAMURA, H. **"An Energy Calculation System for Diesel Railcars"**, Vol.21, (2007).

NAZÁRIO, P. Administração do Transporte. In: FLEURY, P. F.; WANKE, P.; FIGUEIREDO, K. (Org.) **Logística Empresarial: a Perspectiva Brasileira**. São Paulo: Atlas, 2000.

OLYNTHO, C. P. **Soluções de Otimização da Eficiência Energética de uma Ferrovia de Carga**: o caso da Estrada de Ferro Carajás – EFC. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

PEREIRA, D. M. **Apostila de Sistemas de Transportes**. UFPR, 2013. Disponível em: <www.dtt.ufpr.br/Sistemas/Arquivos/apostila-sistemas-2013.pdf>. Acesso em 17 set. 2017.

PNLT – Plano Nacional de Logística e Tranporte. **Relatório Executivo, 2006.** Disponível em: < www.transportes.gov.br>. Acesso em: 30 set. 2017.

___. **Relatório Executivo, 2007.** Disponível em: < www.transportes.gov.br>. Acesso em: 30 set. 2017.

REIS, E. **Estatística Multivariada Aplicada**. Lisboa, Sílabo, 2001.

REIS, V. MEIER, J.F. PACE, G. & PALACIN, R. (2013). **Rail and Multi-modal Transport. Research in Transportation Economics**, Vol. 41.

RIBEIRO, L.B. GHIOTTI, V. VIEIRA, D.S. PEREIRA, O.C. CAVALCANTI, T. **Simulador de Custos Operacionais – Módulo Óleo Diesel.** Companhia Vale do Rio Doce, 2006.

RIBEIRO, P. C. C.; FERREIRA, K. A. **Logística e Transportes: Uma discussão sobre os Modais de Transporte e o Panorama Brasileiro.** In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 22., 2002, Curitiba. Curitiba, ABEPRO, 2002.

ROCHA, G. A. **Proposta de um novo modelo de regressão linear para revisão e controle do indicador de eficiência energética**, 2013.
Disponível em: < www.ufjf.br/engenhariadeproducao/trabalho-de-conclusao>

RODRIGUES, P. R. A. **Introdução aos Sistemas de Transporte no Brasil e a Logística Internacional**. São Paulo: Aduaneiras, 2004.

RODRIGUES, S.C.A. **Modelo de Regressão Linear e suas Aplicações.** Covilhã, 2012.

SARAIVA, P. L. O. MAEHLER, A. E. Transporte Hidroviário: Estudo de Vantagens e Desvantagens em Relação a Outros Modais de Transporte no Sul do Brasil. In: Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais, São Paulo, 2013. **Anais do SIMPOI**, São Paulo: FGV, 2013. Disponível em: <http://www.simpoi.fgvsp.br/arquivo/2013/artigos/e2013_t00018_pcn94902.pdf>. Acesso em 15 set. 2017.

TAKASHINA, N. T. FLORES, M. C. X. **Indicadores da qualidade e do desempenho**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997.

VAZ, A. **A Gestão da Inovação Tecnológica em Ferrovias Brasi leiras de Cargas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2008.

VILAÇA, R., **Infraestrutura e Logística no Brasil:** Transporte Ferroviário de Carga. In: I Simpósio “Infra-Estrutura e Logística no Brasil: Desafios para um País Emergente”, Brasília, 2008.

WALPOLE R.E. **Probability & statistics for engineers & scientists.** Pearson, 2012.

WEISBERG, S. **Applied linear regression**. John Wiley & Sons New York, New York, 2005.

ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.
Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.
Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral[1] e criminais previstas no Código Penal[2], além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 13 de Novembro de 2018.

Kíriam Salgado Lopes	201349091
NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)	Matrícula
Kíriam Salgado Lopes	114.026.596-28
ASSINATURA	CPF

[1] LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.
[2] Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.

Repositório Institucional

Termo de Autorização para publicação de trabalhos acadêmicos em formato eletrônico no Repositório Institucional Digital da Produção Científica e Intelectual da UFJF

1. Identificação da material bibliográfico: ( )Tese ( ) Dissertação (x) TCC graduação ( ) TCC Especialização

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor: Mirian Salgado Lopes
Matrícula: 201349091 CPF: 114.026.596-28 Telefone fixo: (33) 3352-1820
Telefone celular: (33) 98723-5738 E-mail: Lopes.mirian@engenharia.ufjf.br
Nome do orientador: Cristina Márcia Barros de Castro
Título do trabalho: Indicador de eficiência energética de uma empresa ferroviária de carga: análise e proposição de um novo modelo de regressão
Co-orientador: Roberto Malheiros Moreira Filho
Membros da Banca: Cristina Márcia Barros de Castro, Roberto Malheiros Moreira Filho e Clarice Breviglieri Porto

Pós Graduação Stricto Sensu (Mestrado e Doutorado)
Programa: _____ Curso: _____
Área do Conhecimento: _____ Palavras-chave: _____
_____ Data da defesa: __/___/____

Pós-graduação Lato Sensu (especialização)
Curso de Pós-Graduação: _____
Área do Conhecimento: _____ Palavras-chave: _____
_____ Data da defesa: __/___/____

Graduação
Curso: Engenharia de Produção Data da defesa: 13 /11/2018
Área do Conhecimento: Modelagem, simulação e otimização
Palavras-chave: Modelo de regressão linear, eficiência energética, matriz de transporte, modal ferroviário

3. Agência (s) de fomento (se houver): _____

4. Licença de uso

Na qualidade de titular dos direitos de autor do conteúdo supracitado, autorizo o Centro de Difusão do Conhecimento da Universidade Federal de Juiz de Fora a disponibilizar a obra no Repositório Institucional gratuitamente, de acordo com a licença pública ***Creative Commons*** Licença 4.0 Internacional por mim declarada sob as seguintes condições.
Permite uso comercial de sua obra? ( ) Sim (x) não
Permitir alterações em sua obra? ( ) sim ( ) sim, desde que outros compartilhem pela mesma licença (x) não
A obra continua protegida por Direitos Autorais e/ou por outras leis aplicáveis. Qualquer uso da obra que não o autorizado sob esta licença ou pela legislação autoral é proibido.

4. Informação de acesso ao documento:

Liberação para publicação: (x) Total ( ) Parcial
A restrição (parcial ou total) poderá der mantida por até um ano a partir da data de autorização da publicação. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à PROPP ou PROGRAD. Em caso de publicação parcial, o embargo será de 12 meses. Especifique o (s) arquivo(s) capítulo(s) restritos:

_____

Declaração de distribuição não-exclusiva

O referido autor:
a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original e que detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer pessoa ou entidade.
b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à Universidade Federal de Juiz de Fora os direitos requeridos por esta licença e que esse material, cujos direitos são de terceiros, está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdos do documento entregue.
c) Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a UFJF, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo contrato ou acordo.

Assinatura do autor Mirian Salgado Lopes **Data 13/11/2018**