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

Área de Concentração Transportes

Henrique Lugon Ferreira Silva

O IMPACTO DA QUALIDADE DAS VIAS NAS POLÍTICAS DE REABASTECIMENTO DE TRANSPORTADORES RODOVIÁRIOS DE CARGA

VITÓRIA - ES
2015

HENRIQUE LUGON FERREIRA SILVA

O IMPACTO DA QUALIDADE DAS VIAS NAS POLÍTICAS DE REABASTECIMENTO DE TRANSPORTADORES RODOVIÁRIOS DE CARGA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial do título de Mestre em Engenharia Civil – Área de Concentração em Transportes.

Orientadora: Profª Dra. Marta Monteiro da Costa Cruz.

VITÓRIA – ES
2015

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

Silva, Henrique Lugon Ferreira, 1988-
S586i O impacto da qualidade das vias nas políticas de reabastecimento de transportadores rodoviários de carga / Henrique Lugon Ferreira Silva. – 2015.
94 f. : il.

Orientador: Marta Monteiro da Costa Cruz.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Transporte rodoviário de carga. 2. Logística. 3. Pavimentos – Custo operacional. 4. Automóveis. 5. Abastecimento de combustível. 6. Processo decisório – Modelos matemáticos.
I. Cruz, Marta Monteiro da Costa. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

O IMPACTO DA QUALIDADE DAS VIAS NAS POLÍTICAS DE REABASTECIMENTO DE TRANSPORTADORES RODOVIÁRIOS DE CARGA

Henrique Lugon Ferreira Silva

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

Aprovada no dia **24 de agosto de 2015**por:

Profª. Drª. Marta Monteiro da Costa Cruz
Doutora em Engenharia de Transportes
Orientadora - UFES

Profª. Drª. Patrícia Alcântara Cardoso
Doutora em Engenharia de Produção
Membro Interno - UFES

Profª. Drª. Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira
Doutorado em Engenharia Civil
Membro Interno – UFES

Prof. Dr. Márcio Antonio Farah Caldas
Doutor em Logística e Planejamento de Transportes
Membro Externo - UFF

Vitória – ES, agosto de 2015

À minha família por me proporcionar todas as condições para esse momento.

À minha namorada, Mariana, pelo exemplo e apoio que me guiaram.

AGRADECIMENTOS

À melhor orientadora, Marta Monteiro da Costa Cruz, que com extrema paciência conduziu com maestria o caminho para que esse trabalho pudesse acontecer.

Às professoras Patrícia Alcântara Cardoso e Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira, da Universidade Federal do Espírito Santo, e Marco Antônio Caldas, da Universidade Federal Fluminense, por aceitarem participar da Banca Examinadora.

A FAPES (Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo) pela bolsa de estudos.

Aos professores e servidores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo por todos serviços prestados.

RESUMO

Pelo crescimento de sua importância ao longo dos anos dentro de uma empresa ou em sua cadeia de suprimento, as decisões de logística cada vez mais impactam nos negócios nos quesitos de competitividade e de agregação de valor ao cliente e aos acionistas. Dentro do escopo logístico, por possuir uma importância fundamental e um custo visível, o transporte recebe tradicionalmente grande atenção gerencial. Os gastos com combustíveis representam 35% do custo total das empresas transportadoras de cargas rodoviárias. Quando analisados os custos com combustíveis foram observadas variações nos preços entre as regiões, estados e cidades, o que faz com que o custo total com combustível de um veículo, ao realizar uma rota, dependa diretamente de como será definida a política de reabastecimento. Outra condição que impacta nos custos logísticos de transporte do modo rodoviário é o estado de conservação das vias. Além de ser fundamental para o desenvolvimento do país, redução de acidentes e sustentabilidade, a infraestrutura rodoviária influencia nos tempos de viagem, custos operacionais dos veículos e emissão de poluentes. Dentro desse contexto, o trabalho tem como objetivo propor o desenvolvimento de um modelo matemático de tomada de decisão, para estabelecer uma política de reabastecimento de combustível de uma rota fixa considerando a variação do preço do combustível ao longo da rota e o impacto da qualidade da pavimentação das rodovias brasileiras nestas rotas. Como resultado, observou-se que a variação da qualidade das rodovias do país interfere na política de reabastecimento de combustível em uma rota. Espera-se que este modelo auxilie as transportadoras na tomada de decisões e, com isso, sejam reduzidos sensivelmente seus custos de transporte.

Palavras-chaves: Logística, Transporte Rodoviário, Otimização, Reabastecimento de Veículos, Impacto da Pavimentação nos Custos Operacionais.

ABSTRACT

Due to its importance growth over the years within a company or in its supply chain, logistics decisions increasingly affect business in the categories of competitiveness and customer and shareholders added value. Within the scope of logistics, because it has a fundamental importance and a visible cost, transportation traditionally receives large managerial attention. Spending on fuels represent 35% of the total cost for road freight companies carriers. When analyzed the fuel costs, variations in prices were observed between regions, states and cities, which makes the total fuel cost of a vehicle, performing a route, depend directly on how the replenishment policy is set. Another condition that influences road transport costs is the conservation status of the pavement. Besides being essential for the country development, reducing accidents and sustainability, road infrastructure influence on travel times, vehicle operating costs and emissions. In this context, the study aims to propose the development of a mathematical model of decision-making, to establish a fuel refueling policy for a fixed route considering the variation in fuel prices along the route and the impact of pavement quality of Brazilian highways on these routes. As a result, we observe that the quality of Brazilian roads interferes in the refueling policy for a fixed route. It is hoped that this model can assist road carriers in decision-making and thereby significantly reducing their transportation costs.

Keywords: Logistics, Transport, Optimization, Vehicle Refueling, Paving Impact in Operating Costs.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: EXTENSÃO DA MALHA RODOVIÁRIA BRASILEIRA. 22

FIGURA 2: RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA MALHA RODOVIÁRIA BRASILEIRA. 23

FIGURA 3: ETAPAS DO PROCESSO DE MODELAGEM E RESOLUÇÃO DO MODELO. 24

FIGURA 4: MAPA MENTAL DAS ETAPAS DA DISSERTAÇÃO. 26

FIGURA 5: VISÃO GERAL DE UMA ROTA. 33

FIGURA 6: VISÃO GLOBAL DO PROCESSO DE DECISÃO. 34

FIGURA 7: EXEMPLO DE UMA REDE COM 4 NÓS. 37

FIGURA 8: VISÃO GERAL PARA O CASO DA CIDADE DE NOVA IORQUE, EUA. 41

FIGURA 9: VISÃO GERAL DO PREÇO DOS COMBUSTÍVEIS PARA A CIDADE DE VITÓRIA. 42

FIGURA 10: COMPONENTES DOS CUSTOS DOS USUÁRIOS DE RODOVIAS. 44

FIGURA 11: VISÃO GERAL DA ROTA 1. 60

FIGURA 12: LISTA DE PONTOS DE PARADA DA ROTA 1. 61

FIGURA 13: VISÃO GERAL DA ROTA 2. 64

FIGURA 14: LISTA DE PONTOS DE PARADA DA ROTA 2. 65

FIGURA 15: VISÃO GERAL DA ROTA 3. 68

FIGURA 16: LISTA DE PONTOS DE PARADA DA ROTA 3. 69

FIGURA 17: CAMINHÃO SCANIA MODELO R480. 73

FIGURA 18: DETALHES TÉCNICOS DO R480. 73

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: PERCENTUAL DOS CUSTOS LOGÍSTICOS EM RELAÇÃO A RECEITA DAS EMPRESAS NO ANO DE 2012. 17

GRÁFICO 2: PARTICIPAÇÃO PERCENTUAL DOS MODAIS NO ANO DE 2012.....17

GRÁFICO 3: EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO POR SETOR ENTRE 2004 E 2013. 18

GRÁFICO 4: REPRESENTATIVADE DE CADA COMBUSTÍVEL NO CONSUMO RODOVIÁRIO. 19

GRÁFICO 5: VARIAÇÃO DOS PREÇOS DE DIESEL ENTRE AS REGIÕES NO PAÍS. 20

GRÁFICO 6: HISTOGRAMA DOS PREÇOS DE DIESEL NO MUNICÍPIO DE VITÓRIA-ES. 21

GRÁFICO 7: IMPACTO DA PAVIMENTAÇÃO NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....54

GRÁFICO 8: IMPACTO DA PAVIMENTAÇÃO NOS CUSTOS COM PNEUS.....54

GRÁFICO 9: IMPACTO DA PAVIMENTAÇÃO NOS CUSTOS COM REPAROS E MANUTENÇÕES. ...55

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: RESULTADOS COMPUTACIONAIS.....38

TABELA 2: FATOR DE IMPACTO POR QUALIDADE DE PAVIMENTO PARA AS TRÊS DIMENSÕES DE CUSTOS OPERACIONAIS. 56

TABELA 3: INFORMAÇÕES BÁSICAS DOS SEGMENTOS DA ROTA 1.....62

TABELA 4: FATOR DE IMPACTO POR SEGMENTO DA ROTA 1. 63

TABELA 5: PREÇO DO COMBUSTÍVEL EM CADA CIDADE DA ROTA 1. 63

TABELA 6: INFORMAÇÕES BÁSICAS DOS SEGMENTOS DA ROTA 2.....66

TABELA 7: FATOR DE IMPACTO POR SEGMENTO DA ROTA 2. 66

TABELA 8: PREÇO DO COMBUSTÍVEL EM CADA CIDADE DA ROTA 2. 67

TABELA 9: INFORMAÇÕES BÁSICAS DOS SEGMENTOS DA ROTA 3.....70

TABELA 10: FATOR DE IMPACTO POR SEGMENTO DA ROTA 3. 70

TABELA 11: PREÇO DO COMBUSTÍVEL EM CADA CIDADE DA ROTA 3. 71

TABELA 12: CUSTO VARÍAVEL DE VEÍCULOS PESADOS DE CARGA. 72

TABELA 13: CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL PARA VEÍCULO DE GRANDE PORTE....74

TABELA 14: RESULTADOS DO CENÁRIO 1 (ROTA 1 – SEM IMPACTO DA PAVIMENTAÇÃO). 75

TABELA 15: RESULTADOS DO CENÁRIO 2 (ROTA 1 – COM IMPACTO DA PAVIMENTAÇÃO).....76

TABELA 16: RESULTADOS DO CENÁRIO 3 (ROTA 2 – SEM IMPACTO DA PAVIMENTAÇÃO). 77

TABELA 17: RESULTADOS DO CENÁRIO 4 (ROTA 2 – COM IMPACTO DA PAVIMENTAÇÃO).....78

TABELA 18: RESULTADOS DO CENÁRIO 5 (ROTA 3 – SEM IMPACTO DA PAVIMENTAÇÃO). 79

TABELA 19: RESULTADOS DO CENÁRIO 6 (ROTA 3 – COM IMPACTO DA PAVIMENTAÇÃO).....80

TABELA 20: RESUMO DOS RESULTADOS DOS SEIS CENÁRIOS. 81

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: COMPARATIVO DOS TRABALHOS DE MODELOS POR. 39

QUADRO 2: *SOFTWARES* PARA TOMADAS DE DECISÃO DA POLÍTICA DE REABASTECIMENTO. 43

QUADRO 3: RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS VOC. 47

QUADRO 4: FAIXA DE RUGOSIDADE POR ESTÁGIO DE CONSERVAÇÃO DO PAVIMENTO. 55

LISTA DE ABREVIATURAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível

CADE - Conselho Administraivo de Defesa Econômica

CNT – Confederação Nacional de Transportes

CPU - Unidade Central de Processamento

EFE - Empresa de Pesquisa Energética

FRVRP – *Fixed Route Vehicle Refueling Problem*

ILOS – Instituto de Logística e Supply Chain

IRI – *International Roughness Index*

OOR – *Out-of-route*

TKU – Tonelada por Quilômetro Útil

TOE – *Tonne of oil equivalent* (Tonelada Equivalente de Petróleo)

VOC – *Vehicle operating costs*

VRVRP – *Variable-route vehicle refueling problem*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA 16

1.2 JUSTIFICATIVA 19

1.3 OBJETIVO 23

1.3.1 Objetivo Geral 23

1.3.2 Etapas para alcançar o objetivo geral 24

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 26

2 REVISÃO DA LITERATURA 28

2.1 OTIMIZAÇÃO DA POLÍTICA DE REABASTECIMENTO 28

2.2 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS PARA TOMADA DE DECISÃO DA POLÍTICA DE REABASTECIMENTO DE VEÍCULOS 40

2.3 IMPACTO DA QUALIDADE DO PAVIMENTO DAS VIAS NOS CUSTOS OPERACIONAIS DOS VEÍCULOS 43

3 MODELO DA POLÍTICA DE REABASTECIMENTO PROPOSTO 49

3.1 TIPO DE MODELAGEM MATEMÁTICA 49

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS 50

3.2.1 Variáveis Relativas à Rota 50

3.2.2 Variáveis Relativas ao Veículo 51

3.2.3 Variáveis de Resposta 52

3.3 LIMITAÇÕES DO MODELO 52

3.4 MODELO DO IMPACTO DO PAVIMENTO NOS CUSTOS OPERACIONAIS 53

3.5 MODELAGEM DO PROBLEMA 56

4 APLICAÇÃO DO MODELO 59

4.1 ROTAS ESCOLHIDAS 59

4.1.1 Rota 1: Vitória – Porto Alegre 59

4.1.2 Rota 2: Vitória – Cuiabá 64

4.1.3 Rota 3: Vitória – Fortaleza 67

4.2 VEÍCULO ESCOLHIDO 71

4.3 RESULTADOS DA MODELAGEM 74

5 CONCLUSÕES.....82

6 REFERÊNCIAS 84

APÊNDICES 88

APÊNDICE A – ARQUIVO DE DADOS DA ROTA 1 SEM IMPACTO DA PAVIMENTAÇÃO 89

APÊNDICE B – ARQUIVO DE DADOS DA ROTA 1 COM IMPACTO DA PAVIMENTAÇÃO 90

APÊNDICE C – ARQUIVO DE DADOS DA ROTA 2 SEM IMPACTO DA PAVIMENTAÇÃO 91

APÊNDICE D – ARQUIVO DE DADOS DA ROTA 2 COM IMPACTO DA PAVIMENTAÇÃO 92

APÊNDICE E – ARQUIVO DE DADOS DA ROTA 3 SEM IMPACTO DA PAVIMENTAÇÃO 93

APÊNDICE F – ARQUIVO DE DADOS DA ROTA 3 COM IMPACTO DA PAVIMENTAÇÃO 94

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

O valor da logística está inteiramente ligado aos conceitos de tempo e valor. Serviços e produtos não possuem valor considerável quando não estão no seu lugar de consumo em uma determinada hora desejada. Para a maior parte das empresas espalhadas pelo mundo, a logística se transformou em um processo extremamente importante de agregação de valor (BALLOU, 2006).

Pelo crescimento de sua importância ao longo dos anos dentro de uma empresa ou em sua cadeia de suprimento, as decisões logísticas cada vez mais impactam nos negócios nos quesitos de competitividade e de agregação de valor ao cliente e aos acionistas. Essas decisões acabam impactando na possibilidade de redução do preço final do produto e no aumento do nível de serviço (RESENDE et al., 2012).

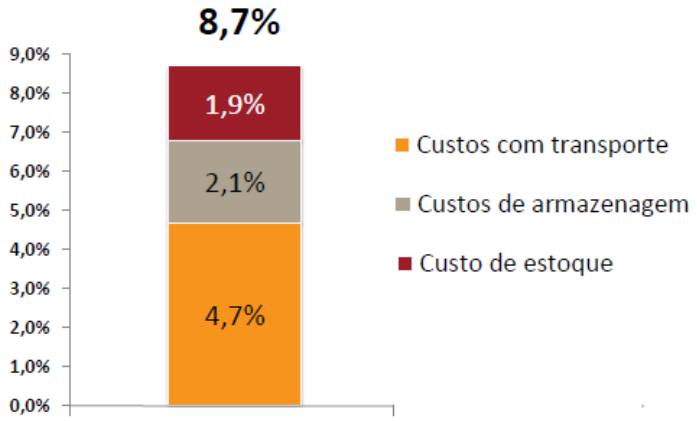
Ainda segundo Resende et al. (2012, p. 5):

> Uma logística eficiente é aquela que, dadas as características e diversidades do ambiente em que atua, consegue, cumprindo dado nível de serviço, minimizar custos e desperdícios. Para alcançar tal resultado a informação tem papel central; é imprescindível o conhecimento, não apenas o da própria empresa, mas o conhecimento global, dos processos logísticos (de abastecimento, planta e distribuição) e seus custos.

Dentro do escopo da logística, o transporte é a área operacional que movimenta e aloca o inventário. Por possuir uma importância fundamental e um custo visível, o transporte recebe tradicionalmente grande atenção gerencial. Quando se trata do transporte do ponto de vista do sistema logístico, três fatores são fundamentais para caracterizar seu desempenho: custo, velocidade e consistência (BOWERSOX et al., 2006). Manter um equilibrio entre esses três fatores é essencial para desenvolver um sistema de sucesso.

Segundo um estudo do Instituto de Logística e Supply Chain (ILOS, 2014), os custos logísticos no Brasil correspondem a 11,5% do Produto Interno Bruto (PIB) do país. Dentro do cenário empresarial, os gastos com logística chegam a cerca de 8,7% da receita líquida, distribuídos conforme ilustrado no Gráfico 1.

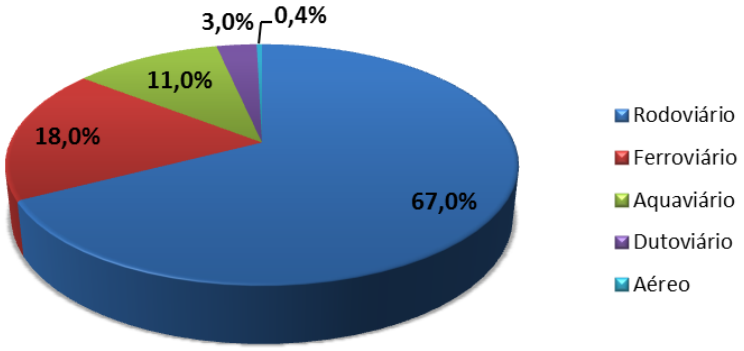
Gráfico 1: Percentual dos custos logísticos em relação a receita das empresas no ano de 2012.



Fonte: Adaptado de ILOS (2014).

Focando na área com maior representatividade nos custos de uma empresa, o transporte, pode-se observar na matriz brasileira uma preponderância do modo rodoviário, que representa mais de dois terços das toneladas por quilômetro útil (TKU) do país (ILOS, 2014).

Gráfico 2: Participação percentual dos modais no ano de 2012.



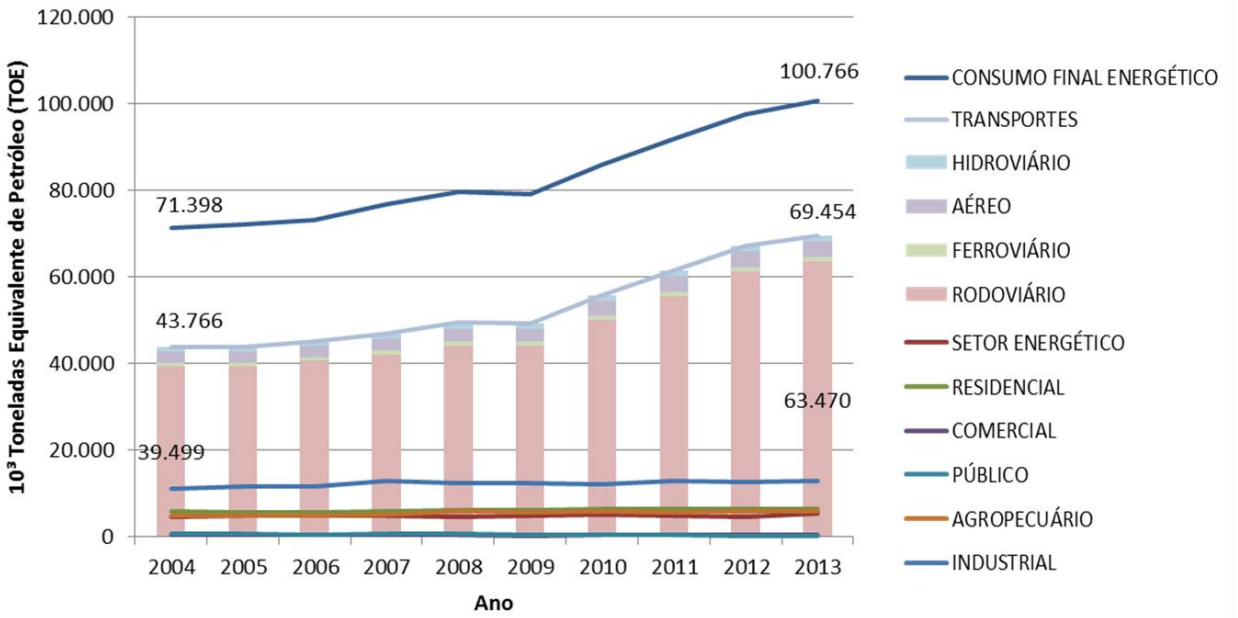
Fonte: ILOS (2014).

De acordo com estimativas da Confederação Nacional de Transportes (CNT), os gastos com combustíveis representam 35% do custo total das empresas transportadoras de cargas rodoviárias (AGÊNCIA CNT DE NOTÍCIAS, 2015).

O consumo do transporte rodoviário de derivados de petróleo é, cada vez mais, peça fundamental analisando a matriz energética brasileira. No ano de 2004, o consumo energético total de derivados de petróleo era de 71.398 toneladas equivalente de petróleo (toe), dos quais 43.766 toe (61%) eram consumidos pelo setor de

transportes. Desse setor, 39.499 toe (90%) eram relativos ao modal rodoviário. Já em 2013, do total de 100.766 toe de consumo energético, 69.454 toe (69%) são consumidos pelo setor de transportes. Desse total, 63.470 toe (91%) é relativo ao modo rodoviário. Ou seja, do aumento de 29.363 toe de 2004 à 2013, 25.688 toe (87%) foram relativos ao setor de transportes sendo 23.971 toe (82%) no modal rodoviário. A evolução do consumo de derivados de petróleo por setor pode ser vista no Gráfico 3.

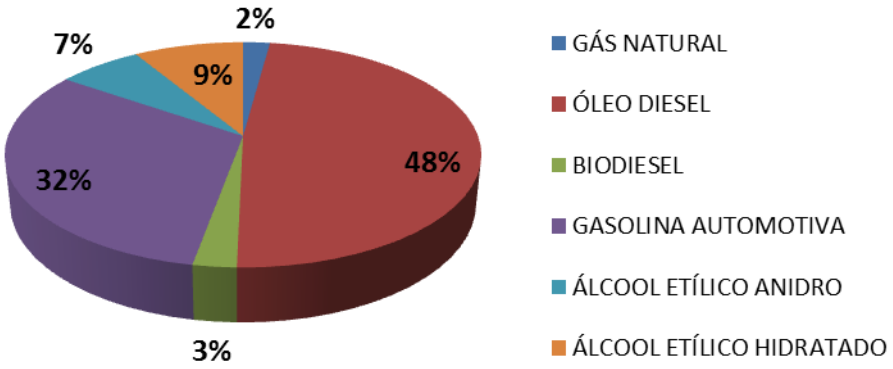
Gráfico 3: Evolução do consumo de derivados de petróleo por setor entre 2004 e 2013.



Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE, 2014).

Dentro do modo rodoviário, o principal combustível utilizado é o óleo diesel, que em 2013 representou 48% do total do consumo. Se considerarmos apenas o transporte rodoviário de cargas esse valor é ainda maior, visto que os carros de passeio no Brasil são, em sua maioria, impulsionados à gasolina e/ou álcool.

Gráfico 4: Representativade de cada combustível no consumo rodoviário.



Fonte: EPE (2014).

Todos esses valores contribuem para confirmar o impacto dos custos de combustíveis nos gastos totais das empresas transportadoras de cargas. Ou seja, uma das maneiras de se aumentar a competitividade nesse setor é a de redução nos gastos com compra de combustível.

Como será visto na revisão de literatura, existem diversas modelagens matemáticas que tratam do assunto de redução de custos de combustíveis para transportadores rodoviários de carga. O conceito básico destes modelos é o de aproveitar a variação de preços existente entre os postos de abastecimento disponíveis em uma malha rodoviária com o objetivo de reduzir os custos que um transportador possui com combustíveis.

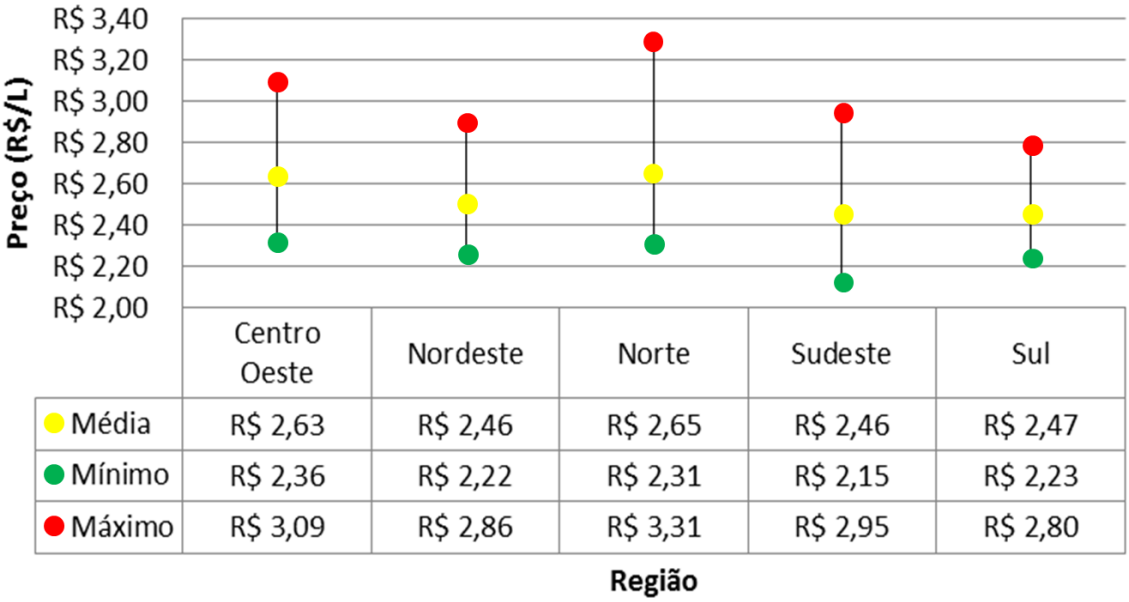
1.2 JUSTIFICATIVA

As modelagens analisadas utilizam a premissa de que os preços dos combustíveis possuem variações entre os diferentes postos de abastecimento em uma malha rodoviária. O órgão que garante que essa variação exista é o Conselho Administraivo de Defesa Econômica (CADE). Apenas no ano de 2013, o CADE aplicou aproximadamente 490 milhões de reais em multas contra cartéis no país (CALEIRO, 2014). Desse total, 120 milhões foram aplicados em seis casos de cartéis de combustível por prática anticoncorrenciais nas cidades de Manaus (AM), Bauru (SP), Londrina (PR), Teresina (PI) e Caxias do Sul (RS) (CADE, 2015). Com uma fiscalização cada vez mais abrangente e o aumento das multas, a tendência é

que cada vez mais existirá uma diferença no preço dos combustíveis dentro do setor dos postos de combustíveis nacionais.

Comprovando essa variação, pode-se observar no Gráfico 5 as variações dos preços mínimos, médios e máximos do diesel dentre as cinco regiões do Brasil na terceira semana do mês de Junho do ano de 2014.

Gráfico 5: Variação dos preços de diesel entre as regiões no país.



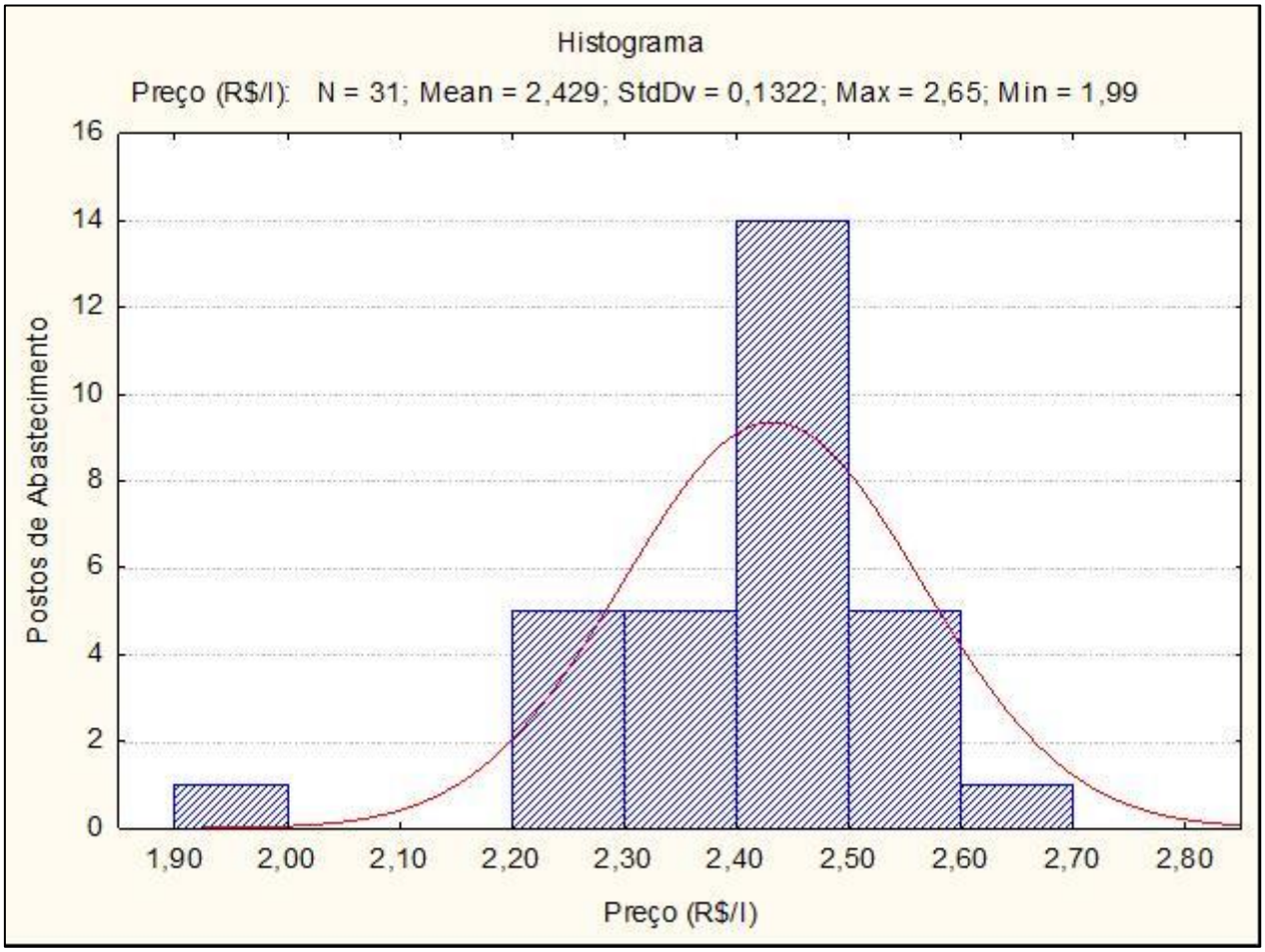
	Centro Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul
Média	R$ 2,63	R$ 2,46	R$ 2,65	R$ 2,46	R$ 2,47
Mínimo	R$ 2,36	R$ 2,22	R$ 2,31	R$ 2,15	R$ 2,23
Máximo	R$ 3,09	R$ 2,86	R$ 3,31	R$ 2,95	R$ 2,80

Fonte: ANP (2014).

Segundo a ANP (2014), no mês de junho de 2014 no estado do Espírito Santo, foram pesquisados 300 postos de abastecimentos, com o preço médio do diesel de R$2,489 e um desvio padrão de R$0,079. O preço mínimo encontrado nos postos pesquisados foi de R$2,25 e o preço máximo de R$2,67, o que gera uma amplitude de preço de R$0,42, que representa 15,7% do preço total.

Dentro do município de Vitória existem 33 postos de abastecimento, dos quais 31 postos vendem o combustível diesel. No Gráfico 6, podemos observar a variação dos preços existentes na terceira semana do mês de Junho de 2014. A média dos preços de diesel encontrada foi de R$2,429/l, com um desvio padrão de R$0,1322/l, um valor máximo de R$2,65/l e um mínimo de R$1,99/l.

Gráfico 6: Histograma dos preços de diesel no município de Vitória-ES.



Fonte: ANP (2014).

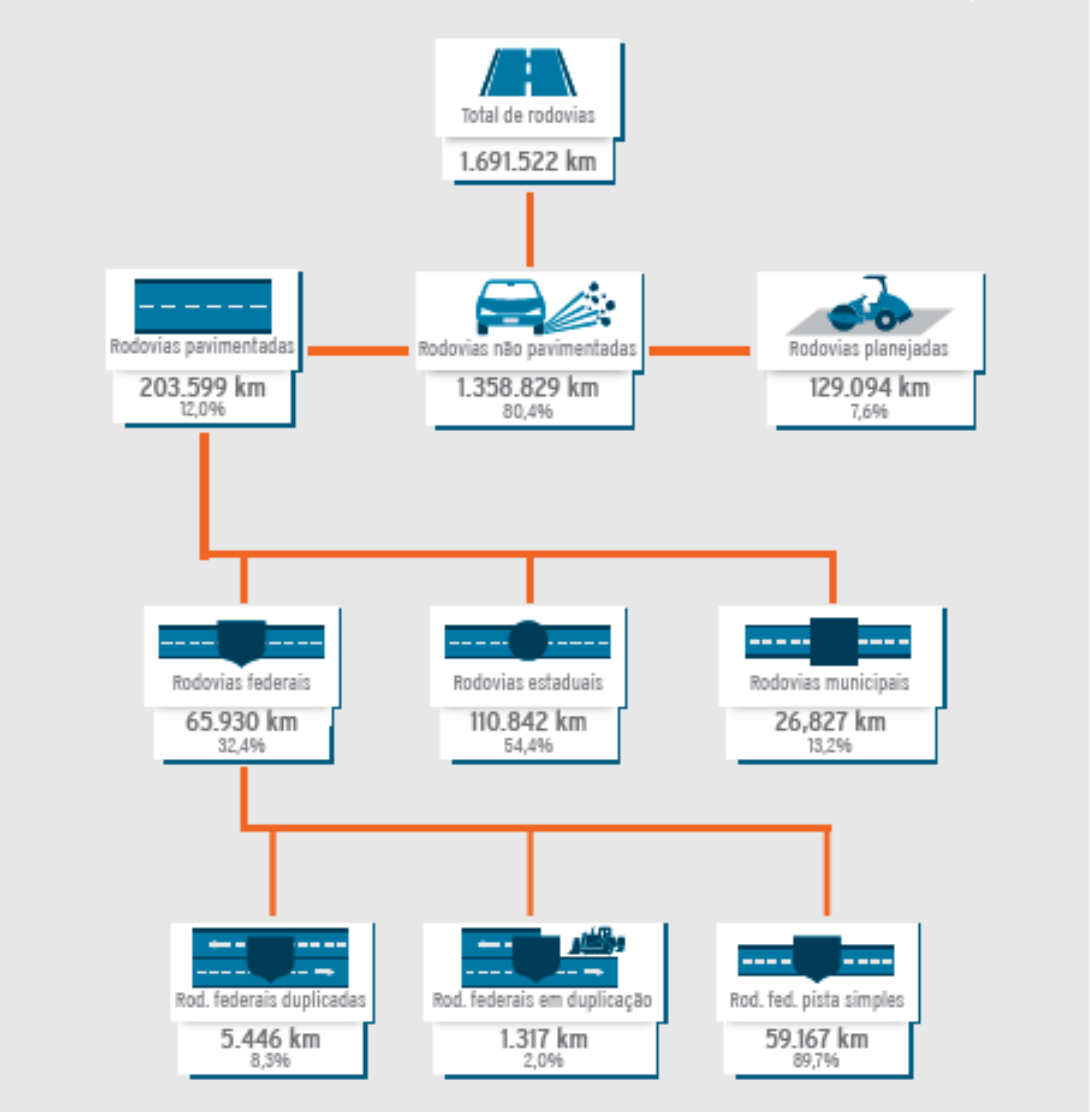
Observadas as variações nos preços entre as regiões, estados e cidades percebe-se que o custo total com combustível de um veículo, ao realizar uma rota, depende diretamente de como será definida a política de reabastecimento. Essa relação entre o custo total e a política de reabastecimento aumenta ainda mais quando as rotas são longas (RODRIGUES, 2011).

Outra condição que impacta nos custos logísticos de transporte do modo rodoviário é o estado de conservação das vias. Além de ser fundamental para o desenvolvimento do país, redução de acidentes e sustentabilidade, a infraestrutura rodoviária influencia nos tempos de viagem, custos operacionais dos veículos e emissão de poluentes (CNT, 2014).

Apesar da predominância do modo rodoviário, quando se analisa a malha do país, nota-se que ainda há um longo caminho a ser percorrido no que diz respeito ao estado de conservação e utilização das vias. Do total de 1.691.522 km de rodovias,

129.094 (8%) km são planejadas, 1.358.829 (80%) km não são pavimentadas e apenas 203.599 (12%) são pavimentadas. Dessa parcela, 65.930 (32%) km são de rodovias federais, das quais 59.167 (90%) km são de pista simples (CNT, 2014).

Figura 1: Extensão da malha rodoviária brasileira.



Fonte: CNT (2014).

Segundo a CNT (2014), são três os principais elementos que afetam diretamente a qualidade de uma rodovia: pavimentação, sinalização e geometria da via.

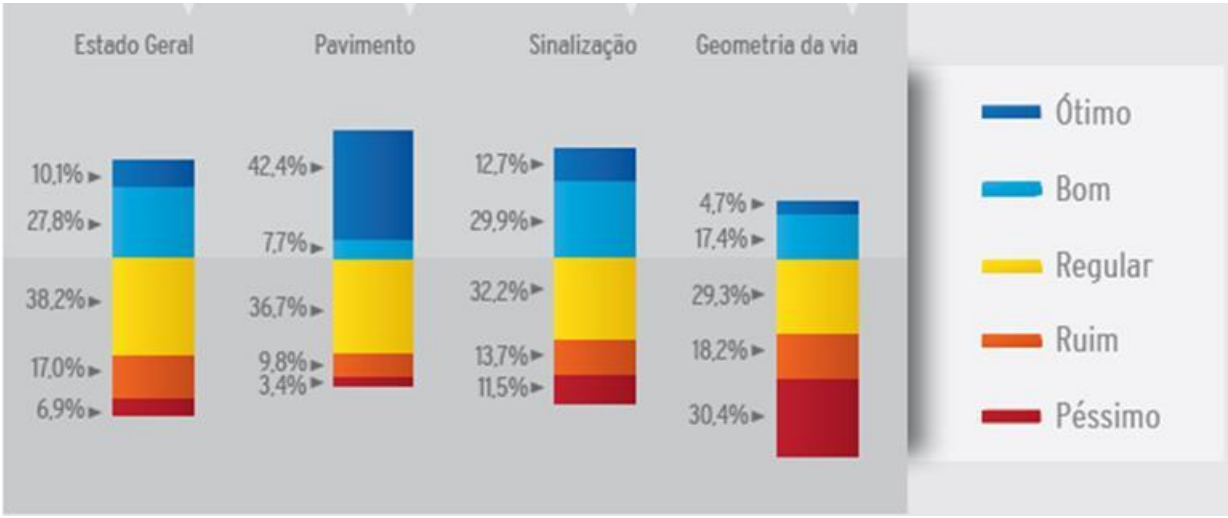
- Pavimentação: analisa as características do pavimento das rodovias, como as condições de superfície, da velocidade devido ao pavimento e da presença de pontos críticos.

- Sinalização: identifica as condições da sinalização horizontal (faixas centrais e laterais), da sinalização vertical (presença de placas de velocidade, placas de indicação e placas de interseção) e visibilidade e legibilidade de todas as placas e defensas.

- Geometria da Via: considera as características geométricas da via, subdivididas em tipo de rodovia, perfil da rodovia, presença de faixa adicional de subida, presença de pontes e viadutos, presença de curvas perigosas, condição da curva perigosa, presença de acostamento e condição do pavimento do acostamento.

Na Figura 2, pode-se observar um resumo das características da malha rodoviária brasileira considerando os elementos acima.

Figura 2: Resumo das características da malha rodoviária brasileira.



Fonte: CNT (2014)

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação é desenvolver um modelo matemático de tomada de decisão, para estabelecer uma política de reabastecimento de combustível de uma rota fixa considerando a variação do preço do combustível ao longo da rota e o impacto da qualidade da pavimentação das rodovias brasileiras nestas rotas.

O modelo desenvolvido se propõe a responder as seguintes perguntas:

- Em quais postos de abastecimento deve-se parar?
- Qual a quantidade de combustível que se deve abastecer?
- Qual o custo total dessa rota?

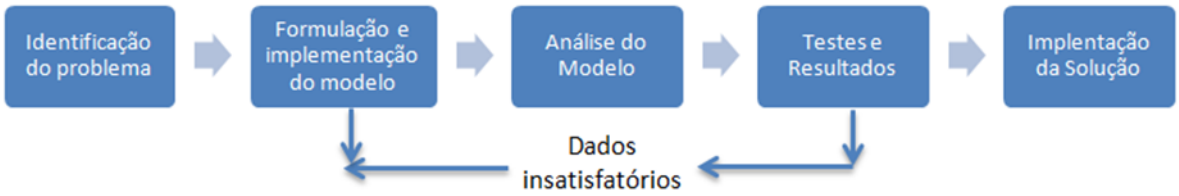
O modelo não considera alterações nos preços do combustível após o veículo iniciar a rota, falta de combustível nos postos de abastecimento e rotas alternativas. Como decisão da escolha do veículo, decidiu-se por optar por um veículo, no caso caminhão, considerado típico.

A perspectiva é a de que este modelo poderá gerar substancial economia para as transportadoras de cargas e, conseqüentemente, para custo logístico das empresas, uma vez que os preços de combustíveis variam substancialmente em diferentes pontos de uma rota, permitindo o melhor controle com relação à utilização dos combustíveis e uma maior fiscalização com relação aos aumentos dos preços nos pontos de abastecimentos. Além disso, o modelo deve auxiliar na definição da criação das tabelas de frete das transportadoras, já que leva em consideração a real condição da qualidade das rodovias nacionais.

1.3.2 Etapas para alcançar o objetivo geral

Para alcançar o objetivo geral da presente pesquisa foram seguidas as seguintes etapas propostas por Ragsdale (2007) Figura 3.

Figura 3: Etapas do processo de modelagem e resolução do modelo.



Fonte: Ragsdale (2007).

A primeira fase é a de identificação do problema, na qual busca-se em pesquisas de campo ou na literatura problemas existentes ou não que possam servir de base para sua pesquisa.

Na segunda fase, formulação e implementação do modelo, deve-se transformar o problema identificado em um modelo matemático que posteriormente será implementado em um programa computacional de resolução de problemas. O programa escolhido para a resolução do modelo foi o OPL CPLEX. O *software* tem como objetivo:

> (...) acelerar o desenvolvimento e a implementação de modelos de implementação, usando programação linear/quadrática, de número inteiro combinado e de restrição, e planejamento baseado em restrição. Assegurar o desenvolvimento confiável e manutenção usando uma linguagem de modelagem transparente e ferramentas intuitivas para testes de modelo, de perfil, e de ajuste (IBM, 2014, p.1).

Na fase de análise do modelo são feitos vários questionamentos sobre o modelo para certificar que a modelagem atende todo o escopo previamente definido. São realizadas diversas revisões na modelagem de modo a se obter uma reprodução matemática cada vez mais próxima da realidade.

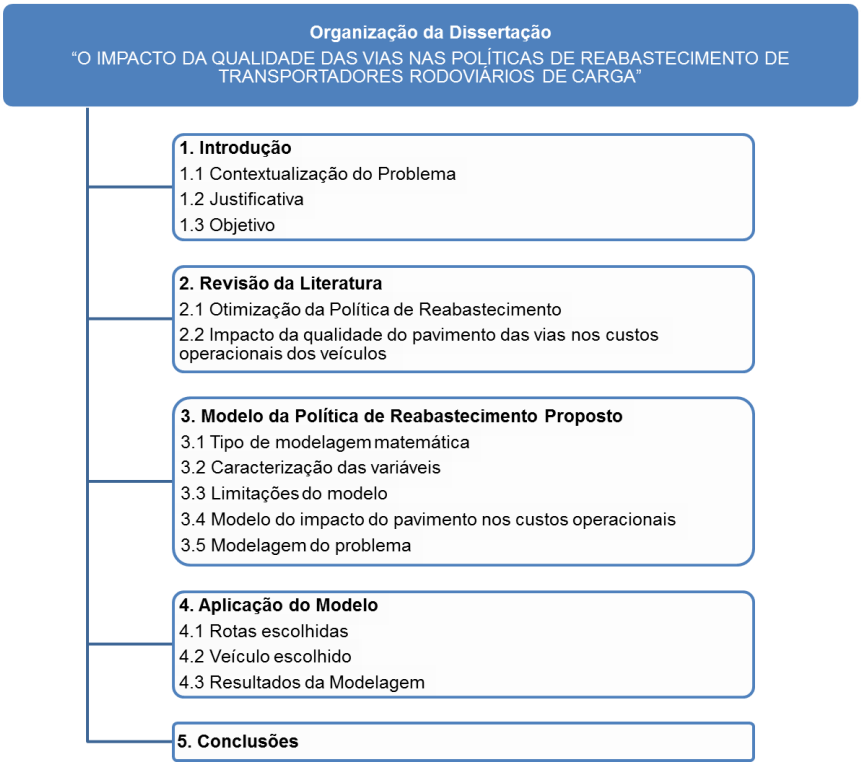
Segundo Rodrigues (2011), a fase de testes e resultados deve verificar se o modelo definido na etapa anterior representa apropriadamente o problema, ou seja, se o modelo prediz adequadamente o comportamento do sistema. Caso os dados sejam insatisfatórios a formulação inicial poderá ser modificada. Esta etapa é responsável de assegurar a integridade e a validação do modelo. A qualidade da solução do modelo dependerá da precisão com que esse modelo representa o problema real.

A quinta e última fase é a da implementação da solução na prática. Essa fase inclui a divulgação do modelo e a transformação dos resultados em decisões dos transportadores rodoviários de carga.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi organizada com base no mapa mental que pode ser observado abaixo.

Figura 4: Mapa mental das etapas da dissertação.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2015).

No Capítulo 1 foi apresentada uma breve contextualização do problema da pesquisa, assim como a justificativa que motivou a escolha do tema e qual o objetivo do trabalho e as etapas para alcançá-lo.

No Capítulo 2 foi realizada a revisão bibliográfica sobre modelos de otimização da política de reabastecimento, incluindo algoritmos, heurísticas, programação linear e não linear, e programas computacionais. Além disso foi revista a bibliografia em relação aos modelos para determinação dos custos operacionais dos veículos utilizando como parâmetro a qualidade do pavimento das vias.

No Capítulo 3 encontra-se o modelo da política de reabastecimento proposto, incluindo o tipo de modelagem apresentada, as variáveis utilizadas e suas respectivas descrições, e as limitações do modelo.

No Capítulo 4, por sua vez, apresenta-se a aplicação da modelagem proposta para três rotas selecionadas com origem em Vitória-ES e destino em três regiões diferentes do Brasil: Nordeste, Sul e Centro-Oeste.

Finalmente, no Capítulo 5, elencaram-se as principais conclusões do estudo apresentado e sugestões para pesquisadores que desejam trabalhar no tema selecionado no futuro.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta revisão de literatura aborda os principais trabalhos relacionados ao tema da otimização da política de reabastecimento e impacto da qualidade das rodovias nos custos operacionais dos veículos. A revisão abrange diversos trabalhos publicados incluindo o atual estado da arte do assunto.

Primeiramente, serão apresentados os trabalhos científicos relativos à política de reabastecimento. Em seguida, os programas computacionais referentes ao assunto. Finalmente, serão abordados trabalhos relativos ao impacto da qualidade das rodovias, principalmente na dimensão de pavimentação, no consumo de combustível e custos operacionais dos veículos.

2.1 OTIMIZAÇÃO DA POLÍTICA DE REABASTECIMENTO

A primeira e mais simples forma de problemas de reabastecimento de veículos é o Problema de Reabastecimento de Veículos com Rota Fixa (FRVRP - Fixed-Route Vehicle Refueling Problem). O FRVRP procura a política ótima, ou seja, a melhor sequência de paradas a serem usadas e a quantidade a ser abastecida em cada parada, para uma rota com origem e destino pré-determinados (SUZUKI; DAI, 2012). Segundo Suzuki (2008a), esses problemas começaram a serem aplicados em softwares otimizadores de combustível em meados dos anos 1990 por empresas de consultoria em transportes. O conceito básico do modelo é obter vantagem das variações dos preços dos combustíveis que existem entre os postos de abastecimento para reduzir o custo com combustível. A ideia é abastecer mais onde o combustível é barato e menos onde o preço é mais alto.

Apesar de muito útil em alguns aspectos, os otimizadores de combustível não garantem a resolução dos problemas de FRVRP para sua otimalidade, apenas se aproximando do ótimo. Segundo Suzuki (2008b), o primeiro trabalho teórico que considera o aspecto de “onde comprar” combustível para problemas de reabastecimento de veículos foi o de Lin et al. (2007). O trabalho considera um problema de reabastecimento para um veículo com um tanque de combustível com uma capacidade fixa e se locomovendo em uma rota fixa para desenvolver um

algoritmo de tempo de execução linear para encontrar a política ótima de reabastecimento.

> O algoritmo desenvolvido pelos autores baseou-se no caso especial do problema de dimensionamento da produção em inventários capacitados (inventory capacity lot size problem) onde existe uma capacidade limitada do inventário, os custos de preparação são nulos, os custos de manter os estoques são também nulos e os custos de produção são lineares (RODRIGUES, 2011, p. 46).

Seguindo o trabalho pioneiro de Lin et al. (2007), Khuller et al. (2008) apresenta quatro tipos de problemas relacionados a política de reabastecimento. Os quatro problemas são os seguintes:

- **O problema do posto de abastecimento**: dado um ponto de saída e um ponto de destino, avalia-se qual a maneira mais econômica de ser fazer o percurso dada uma certa quantidade inicial de combustível. É possível restringir o número máximo de paradas para reabastecimento.

- **O problema do posto de abastecimento com rota pré-fixada**: um caso especial do problema acima no qual o objetivo é encontrar uma combinação ótima de pontos de reabastecimento em uma determinada rota entre a origem e o destino.

- **O problema do posto de abastecimento em caixeiro-viajante com preços uniformes**: dada uma quantidade de cidades e uma quantidade de postos de abastecimento qual o menor caminho possível de se visitar todas as cidades garantindo que o veículo nunca fica sem combustível. Nesse problema considera-se que o preço do combustível em todos os postos de abastecimento é igual.

- **O problema do posto de abastecimento em caixeiro-viajante com preços variantes**: similar ao problema anterior com a diferença de que os preços entre os postos de abastecimento podem variar.

Para cada um deles foi desenvolvido um algoritmo com o intuito de encontrar a resolução do problema. Para os dois primeiros problemas foram desenvolvidos

algoritmos de tempo polinomial e para os problemas de caixeiro-viajante, por estes serem considerados como NP-hard, indicou-se algoritmos aproximativos.

Lin (2008) complementou seu trabalho do ano anterior desenvolvendo um algoritmo que minimiza o custo total com combustível que leva em conta todas as opções de rotas existentes entre um par origem-destino escolhida. O autor realizou um estudo sobre as propriedades dos problemas de otimização de combustível em cada rota com o objetivo de mostrar que encontrar a política ótima de reabastecimento em uma malha rodoviária é o mesmo que encontrar os caminhos mínimos de uma malha parcial da malha total na qual é realizado uma modelagem finita em todos os possíveis caminhos, considerando as distâncias entre os vértices como custos de deslocamento (RODRIGUES, 2011). Nesse trabalho, o autor também introduziu o conceito de manter sempre uma quantidade mínima de combustível no tanque, visando evitar que o veículo fique sem combustível como, por exemplo, em caso de trânsito; e a condição de que o volume de combustível no tanque no destino seja ao menos igual ao volume na origem, eliminando assim o ganho relativo a quantidade inicial.

Segundo Suzuki (2008a), todos esses trabalhos anteriores foram de grande valia para o entendimento do problema de reabastecimento de veículos. Porém, nenhum deles leva em consideração os custos operacionais dos veículos, apenas os custos com combustíveis. Os custos operacionais considerados são: custo de manutenção do veículo, custo de depreciação e custos de oportunidade. Além disso, este foi o primeiro trabalho a investigar empiricamente o desempenho dos modelos otimizadores de combustível utilizando um série de simulações. O autor também introduz o conceito de distância OOR (*out-of-route*) ou fora de rota, que é a distância que um veículo deve percorrer para buscar um posto de abastecimento com preços interessantes que esteja fora de sua rota.

O modelo para o problema dos otimizadores de combustível proposto é um problema de programação linear inteiro misto, conforme Equações 1 à 11.

$$Minimize_{\emptyset_i \geq 0, S_i}\{\sum_{i\in\Omega}(Price_i \emptyset_i) + OM(DC + MC) + \sum_{i\in\Omega}(2\delta_i Out_i)LPM + [\sum_{i\epsilon\Omega}(\delta_i) - MRS]LPS\} \quad (1)$$

Sujeito à:

$$\delta_i \in \{0,1\}\ \forall\ i \in \Omega \quad (2)$$

$$Fuel_i \geq LF\ \forall\ i\ \in \Omega \quad (3)$$

$$Fuel_d \geq EF \quad (4)$$

$$\emptyset_i \geq \delta_i\ MP\ \forall\ i\ \in\ \Omega \quad (5)$$

$$\emptyset_i \leq \delta_i\ TC\ \forall\ i\ \in\ \Omega \quad (6)$$

$$Fuel_i + \emptyset_i \leq TC\ \ \forall\ i\ \in \Omega \quad (7)$$

$$Fuel_i = \left\{\frac{SF - \left(\frac{Mile_i}{MG(h)}\right) - \left(\frac{\delta_i Out_i}{MG(l)}\right),\ \ se\ i{=}1}{Fuel_{i-1} + \emptyset_{i-1} - \left(\frac{Mile_i}{MG(h)}\right) - \left(\frac{\delta_{i-1} Out_{i-1} + \delta_i Out_i}{MG(l)}\right),\ \ se\ i{\neq}1}\right\} \quad (8)$$

$$Fuel_d = Fuel_n + \emptyset_n - \left(\frac{Mile_d}{MG(h)}\right) - \left(\frac{\delta_n Out_n}{MG(l)}\right) \quad (9)$$

$$OM = \sum_{i\in\Omega}(Mile_i) + Mile_d + \sum_{i\in\Omega} 2\delta_i Out_i \quad (10)$$

$$MRS = \max\left(0, \frac{\left(\left(\sum_{i\in\Omega}(Mile_i) + Mile_d\right)/MG(h)\right) - (SF - EF)}{TC - LF}\right) \quad (11)$$

Onde:

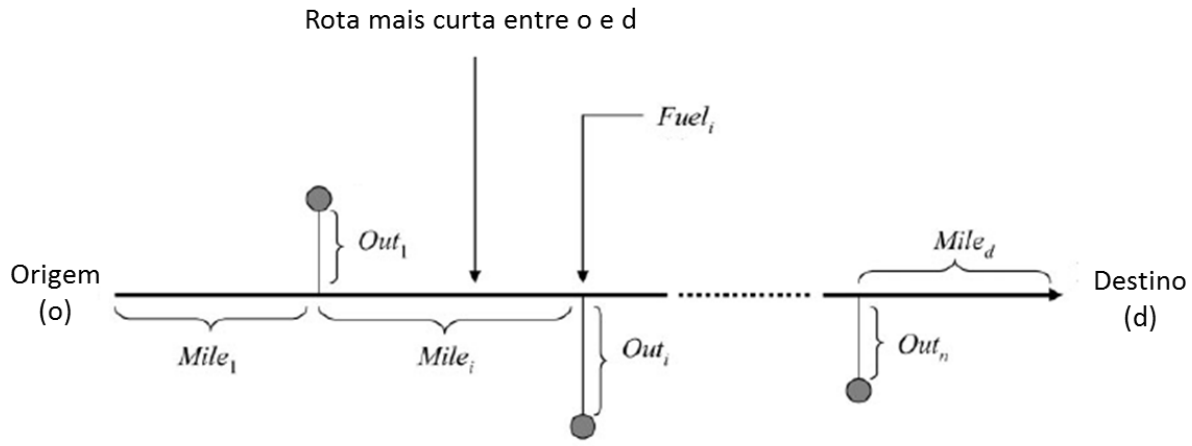
- $\mathrm{Price_i}$ = preço do combustível ($/galão) na parada i
- Out_i = quantidade de milhas que o veículo deve ser sair da rota (OOR) para chegar à parada i
- $\mathrm{Mile_i}$ = distância (milhas) da parada i-1 para i
- SF = quantidade de combustível (galões) no tanque na origem o (combustível inicial)
- MG = consumo médio de combustível (milhas por galão ou MPG)
- TC = capacidade do tanque do veículo
- LF = quantidade mínima de combustível a ser mantida no tanque do veículo
- MP = quantidade mínima de combustível a ser consumida em cada parada
- EF = quantidade de combustível requerida no destino d (combustível final)
- MC = custo de manutenção do veículo ($/milha)
- DC= custo de depreciação do veículo ($/milha)
- MG(h) = consumo de combustível (MPG) em rodovias
- MG(l) = consumo de combustível (MPG) fora de rodovias

- LPM = custo de oportunidade (lucro perdido) associado com a distância OOR ($/milha OOR)
- LPS = custo de oportunidade (lucro perdido) associado com as paradas de combustível ($/parada)
- δ_i = 1 se a parada i é selecionada como ponto de reabastecimento, 0 caso contrário
- $\emptyset_i$= quantidade de combustível a ser abastecido na parada i
- $\mathrm{Fuel_i}$ = quantidade de combustível no tanque na parada i antes do reabastecimento (se $\delta_i = 1$) ou no ponto mais perto de i durante a rota (se $\delta_i = 0$)
- $Fuel_d$ = quantidade de combustível no destino d
- OM = distância real entre a origem e o destino incluindo distânicas OOR (milhas)
- MRS = número mínimo de paradas que um veículo deve fazer.

No modelo a restrição (3) garante uma quantidade mínima de combustível no tanque e a restrição (4) que a quantidade de combustível final seja ao menos igual uma quantidade determinada. As restrições (5) e (6) garantem que a quantidade de combustível comprada será maior que um determinado mínimo e menor que a capacidade do tanque. A restrição (7) garante o cumprimento da capacidade do tanque do veículo. As restrições (8) e (9) calculam as quantidades de combustível no tanque em cada parada antes do abastecimento e a quantidade no destino. A restrição (10) calcula a distância total percorrida pelo veículo e a restrição (11) determina o número mínimo de paradas que o veículo deve fazer.

Esse modelo apresentado possui três recursos interessantes. Primeiro, o modelo mantém a forma linear dos modelos tradicionais e utiliza o mesmo número de variáveis de decisão e restrições desses modelos, o que implica que a resolução computacional do modelo proposto é tão simples quanto a do modelo tradicional. Segundo, o modelo apresentado pode ser visto como um modelo genérico dos otimizadores de combustíveis tradicionais. Isso porque, se MG(h) = MG(l) e MC = DC = LPM = LPS = 0, o modelo proposto se iguala aos modelos tradicionais. Terceiro, o modelo apresenta soluções mais desejáveis aos motoristas, pois escolhe as paradas com menor distância OOR e compra uma quantidade de combustível maior por parada de abastecimento (SUZUKI, 2008a).

Figura 5: Visão geral de uma rota.



Fonte: Adaptado de Suzuki (2008a).

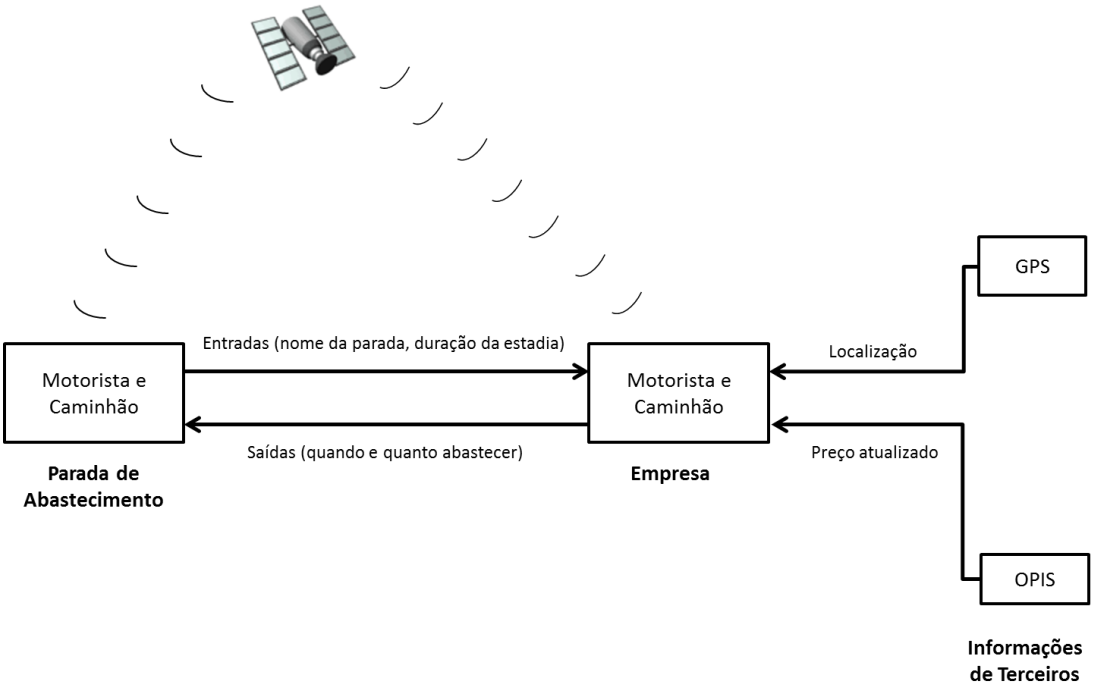
Para validação do modelo proposto, Suzuki (2008a) utilizou simulações computacionais com dados obtidos por meio de uma empresa de transportes americana de médio porte além de outras fontes. As simulações realizadas sugerem que o modelo proposto, em comparação com o modelo tradicional, pode diminuir o custo operacional do veículo e produzir soluções mais desejáveis do ponto de vista dos caminhoneiros, já que diminui a distância OOR percorrida e a frequência de paradas para reabastecimento.

Segundo Suzuki (2008b), apesar da capacidade de redução de custos dos otimizadores de combustíveis existentes até o momento, as empresas de transportes ainda encontravam muita resistência de adotá-los por duas razões: os otimizadores tiram a liberdade dos motoristas de escolher suas paradas de abastecimento, sendo que muitos utilizam as mesmas paradas durante anos e possuem fortes preferências por elas; e podem aumentar as taxas de rotatividade dos motoristas das empresas. Esses problemas são resolvidos com uma abordagem de deixar os motoristas escolherem seus pontos de paradas e se aproveitar das flutuações dinâmicas dos preços dos combustíveis nas paradas. As únicas duas instruções que devem ser seguidas pelos motoristas são: quanto de combustível comprar na parada e quando comprar o combustível (antes ou depois do descanso).

Duas heurísticas são utilizadas para resolver o novo problema proposto: (i) heurística do problema antes-depois e (ii) heurística do problema mín-max. A heurística do problema antes-depois se aproveita das variações dos preços dos

combustíveis durante o descanso noturno dos motoristas. Caso o preço do combustível diminua durante o descanso, o motorista deverá abastecer após o descanso, caso contrário deverá abastecer antes. A heurística do problema mín-max compara o preço do combustível do atual ponto de abastecimento escolhido pelo motorista com os preços previstos para os próximos postos, decidindo assim quanto deve ser abastecido no local. Uma visão global do processo de decisão pode ser visto na Figura 6 (SUZUKI, 2008b).

Figura 6: Visão global do processo de decisão.



Fonte: Adaptado de Suzuki (2008b).

Rodrigues (2011) utiliza uma modelagem com rotas fixas e paradas de abastecimento definidas previamente. As restrições logísticas e as características técnicas dos veículos são as entradas do modelo, que possui como saída a quantidade total de combustível que deve ser abastecida a cada parada. A formulação matemática é definida como:

$$Minimize\ Z = \sum_1^n c_i q_i + \sum_1^n c_i q_i' \quad (12)$$

Sujeito à:

$$v_i + q_i - \frac{d_{i,i+1}}{k} \geq S\ \forall\ 1 \leq i \leq (n-1) \quad (13)$$

$$v_i' + q_i' - \frac{d_{i,i+1}}{k} \geq S \; \forall \; 2 \leq i \leq n \quad (14)$$

$$v_i + q_i \leq Q \qquad \forall \; i \in n \quad (15)$$

$$v_i' + q_i' \leq Q \qquad \forall \; i \in n \quad (16)$$

$$v_i' = S \quad (17)$$

$$q_i \geq 0 \quad (18)$$

$$q_i' \geq 0 \quad (19)$$

Onde:

- i = número da parada
- q_i = quantidade de combustível abastecida no ponto i na viagem ao primeiro destino
- q_i' = quantidade de combustível abastecida no ponto i na volta
- v_i = quantidade de combustível no tanque no ponto i na viagem ao primeiro destino
- v_i' = quantidade de combustível no tanque no ponto i na volta
- Z = custo total de combustível
- c_i = preço do combustível (R$/litro) no ponto i
- $d_{i,i+1}$ = distância do ponto i ao próximo ponto (i+1)
- k = consumo médio de combustível (km/l)
- Q = capacidade do tanque de combustível (litros)
- S = quantidade mínima de combustível no tanque (variável de segurança).

No modelo proposto a equação (12) é a função objetivo, ou seja, o custo total de combustível na volta completa do veículo. As equações (13) e (14) são restrições de segurança do modelo. A equação (13) garante que o veículo terá sempre a quantidade mínima de S litros de combustível no tanque entre a origem e o destino, e a equação (14) garante a mesma quantidade mínima no retorno. As equações (15) e (16) são restrições de capacidade máxima do tanque do veículo. A equação (15) garante que a quantidade de combustível no tanque nunca supere a sua capacidade no trajeto origem-destino e a equação (16) garante o mesmo limite na volta. A equação (17) garante que o veículo termina seu ciclo com o tanque no seu limite de segurança. As equações (18) e (19) são equações de não-negatividade (RODRIGUES, 2011).

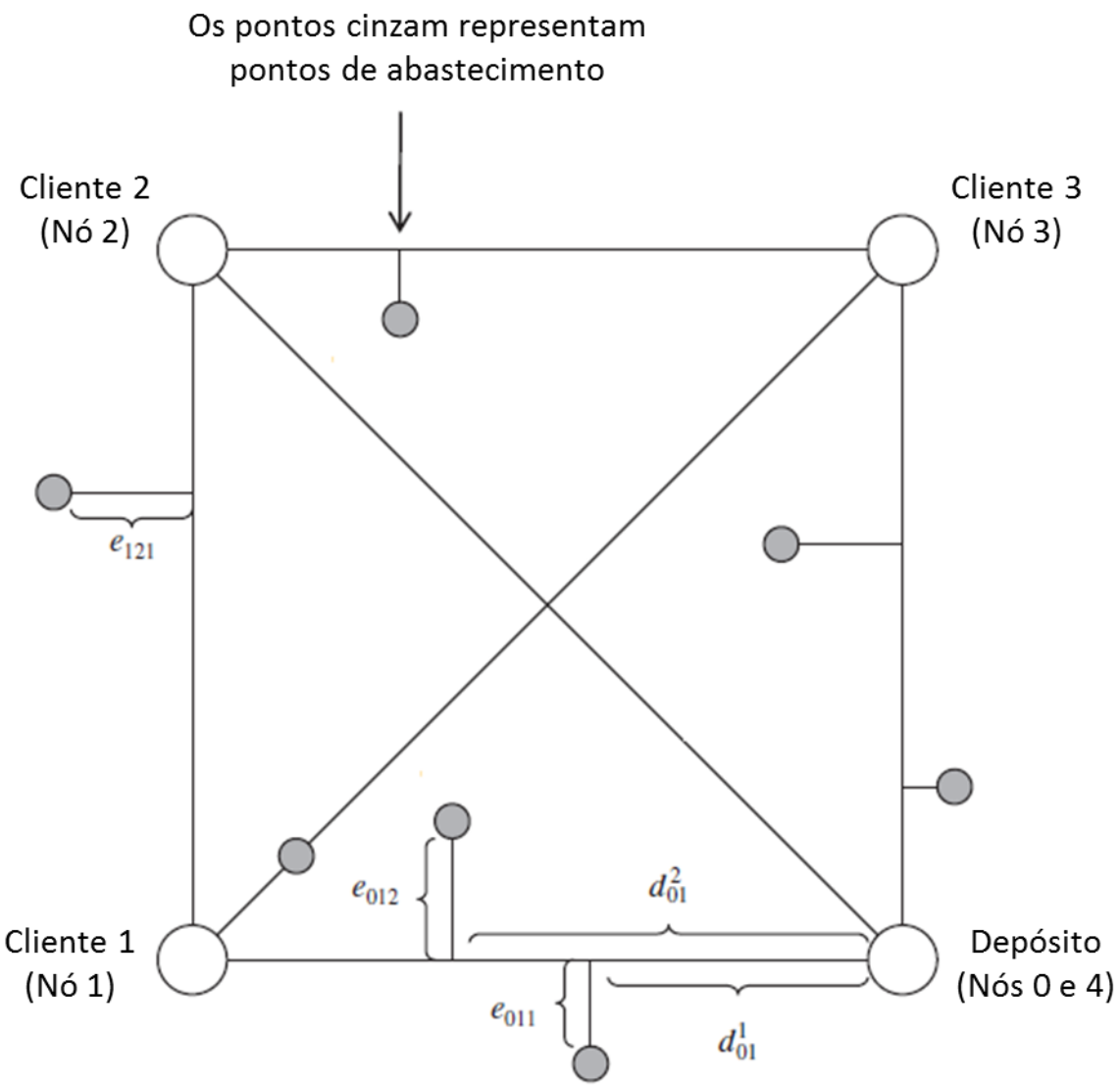
Ao contrário das propostas anteriores, onde são utilizadas simulações para validação dos modelos, é utilizado um estudo de caso que apresenta uma redução de 2,3% no custo total do combustível.

Suzuki (2012) apresenta uma modelagem matemática capaz de resolver o problema do caixeiro-viajante com janela de tempo. A diferença dos trabalhos anteriores é o fato dos veículos começarem e terminarem sua rota na origem do problema, o que transforma o problema em um problema de caixeiro-viajante com solução bastante difícil, por ser um problema considerado NP-hard; e o fato de os clientes possuírem uma janela de tempo no qual eles aceitam ser atendidos, ou seja, o veículo necessita chegar a cada cliente entre um horário de abertura e fechamento pré-definidos. Esse é um tipo de problema de roteamento muito comum nas transportadoras no dia-a-dia e envolve encontrar uma rota com custo mínimo, saindo e chegando no mesmo ponto e visitando um conjunto de clientes exatamente uma vez, cada qual com uma janela de tempo específica. Um exemplo de uma rede contendo 4 nós, ou clientes, pode ser visto na Figura 7.

A modelagem proposta considera dois fatores adicionais ainda não considerados em outros modelos. O primeiro fator é a carga do veículo. Sabe-se que a carga útil que o veículo está carregando afeta diretamente a sua taxa de consumo de combustível, quanto mais pesado está um caminhão, maior é o seu consumo. O modelo se aproveita disso para tentar minimizar a distância percorrida enquanto com uma carga pesada. O segundo fator é o consumo de combustível durante o tempo de espera nos clientes. Como cada cliente possui uma janela de tempo específica na qual ele realiza os atendimentos, a solução ideal muitas vezes requer que um veículo espere no cliente enquanto aguarda seu horário de atendimento.

Considerando, durante a espera, uma taxa de consumo de combustível de 70% do valor do consumo normal, foram testados três cenários do modelo proposto, visitando 5, 10 e 15 clientes. A análise indica que existe uma possível diminuição significativa do consumo de combustível através da entrega de itens pesados nas primeiras paradas de uma rota enquanto entrega-se itens leves nos clientes posteriores, de modo que a distância que um veículo se desloca com cargas pesadas pode ser minimizada. Isso produz uma economia de combustível entre 4,9% e 6,9% quando comparado ao método convencional de menor distância (SUZUKI, 2012).

Figura 7: Exemplo de uma rede com 4 nós.



Fonte: Adaptado de Suzuki (2012).

Ainda no mesmo ano, Suzuki e Dai (2012) propõem comparar dois métodos de resolução sugeridos para o problema de reabastecimento de veículos rodoviários transportadores de carga: o problema de reabastecimento de veículos com rotas variáveis (*variable-route vehicle refueling problem* – VRVRP) e uma alternativa tradicional de aplicação de uma heurística. O experimento foi conduzido utilizando a malha rodoviária de sete estados americanos com as características de suas vias e preços de combustíveis dos postos de abastecimento. Os resultados obtidos nesse estudo podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados Computacionais.

ID da Instância	Método Heurístico			Método Exato (VRVRP)		
	Distância (km)	Custo com Combustível ($)	Tempo de CPU (s)	Distância (km)	Custo com Combustível ($)	Tempo de CPU (s)
1	842,5	498,4	0,2	858,7	496,4	0,3
2	900,6	527,3	0,1	946,8	522,7	0,3
3	1.337,7	686,2	0,0	1.337,7	686,2	0,1
4	1.567,0	758,8	0,1	1.567,0	758,8	0,2
5	992,7	557,9	0,1	998,8	551,5	0,9
6	1.027,7	563,3	0,2	1.033,8	555,7	0,6
7	1.185,6	563,6	0,0	1.185,6	563,6	0,0
8	1.369,6	681,3	0,0	1.369,6	681,3	0,3
9	1.026,4	584,8	0,2	1.076,0	584,6	0,7
10	1.677,5	814,5	0,1	1.677,5	814,5	0,2
11	1.497,5	754,4	0,1	1.497,5	754,4	0,1
12	1.496,2	755,7	0,0	1.496,2	755,7	0,0
TOTAL	**14.921,0**	**7.746,1**	**1,0**	**15.045,2**	**7.725,2**	**3,8**

Fonte: Adaptado de Suzuki e Dai (2012).

Da Tabela 1, pode-se observar que o método exato, apesar de aumentar a distância percorrida em 124,2 quilômetros, diminui o custo com combustível em $20,90, redução de 0,3%. Ainda assim, o método exato foi capaz de responder ao modelo em tempo hábil bastante reduzido.

Com o objetivo de comparar os modelos apresentados, foi criado um quadro onde se encontram um resumo de cada trabalho sobre o problema de otimização da política de reabastecimento.

Quadro 1: Comparativo dos trabalhos de modelos POR.

Autores	Ano	Importância do Estudo	Abordagem Matemática	Tipo de Rota	Tipo de Validação
Lin et al	2007	Desenvolveram um algoritmo de tempo de execução linear para encontrar a política ótima de reabastecimento em rotas fixas.	Algoritmos	Rota Fixa	-
Khuller et al	2008	Desenvolveram algoritmos de otimização de combustível baseados nos problemas de caminho mínimo e roteirização de veículos.	Algoritmos	Rota Variável	Simulação
Suzuki	2008a	Propôs um modelo que considera não apenas os custos com combustível, mas também os custos operacionais do veículo que são afetados por essa tomada de decisão.	Programação Linear Inteira Mista (PLIM)	Rota Fixa	Simulação
Lin	2008	Desenvolveu diversos algoritmos de problema de otimização de combustível considerando rotas fixas e variáveis.	Algoritmos	Rota Variável	-
Suzuki	2008b	Adicionou novas restrições no modelo de otimização de combustível com o objetivo de reduzir o custo total de combustível sem confiscar a liberdade de escolha dos pontos de parada pelos motoristas. Considerou a utilização de ferramentas de GPS.	Programação Linear Inteira Mista (PLIM)	Rota Fixa	Simulação
Rodrigues	2011	Diferentemente dos trabalhos anteriores, utilizou como método de validação um estudo de caso em vez de simulação.	Programação Linear Inteira Mista (PLIM)	Rota Fixa	Estudo de Caso
Suzuki	2012	Adicionou novas restrições em comparação aos seus trabalhos anteriores, como a inserção de janelas de tempo de atendimento aos clientes. Além disso, trabalhou com o problema do caixeiro-viajante como proposta de rota, tornando o problema um NP-hard.	Algoritmos	Rota Variável	Estudo de Caso
Suzuki e Dai	2012	Aprimoramento dos métodos de roteamento de veículos com rotas variáveis anteriores. Utilização de um método rápido e exato de resolução.	Programação Linear Inteira (PLI)	Rota Variável	Estudo de Caso

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

2.2 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS PARA TOMADA DE DECISÃO DA POLÍTICA DE REABASTECIMENTO DE VEÍCULOS

Segundo Marchiori (2014), existem três grupos de programas computacionais desenvolvidos com objetivo de auxiliar a tomada de decisão da política de reabastecimento de veículos: *softwares, websites* e aplicativos de *smartphones*.

Dentro da categoria de *softwares*, podemos destacar os programas Promiles, IDSC Expert Fuel e Fuel & Route. O Promiles permite ao usuário criar, comparar, modificar e olhar sua própria rede de compra de combustível. Com o programa é possível visualizar as tendências dos preços dentro de uma região ou em todo país, mostrando onde está o posto de abastecimento com o menor preço de combustível (PROMILES, 2015).

Segundo a IDSC (2015), o Expert Fuel proporciona ao condutor um plano de combustível otimizado no momento da expedição, determinando onde e quanto de combustível abastecer a fim de minimizar o custo. Combinado com o plano de combustível, o motorista também recebe o plano de rota mais eficiente proporcionando economias adicionais na redução da distância OOR. Todos os fatores relevantes das rotas e veículos são considerados na solução, incluindo: preços atuais dos combustíveis, nível de combustível, consumo de combustível do veículo, implicações fiscais estaduais, repercussões sobre a rede de combustível, distância OOR, políticas de rotas, políticas de terminal de abastecimento, políticas de enchimento do tanque, e necessidades dos motoristas.

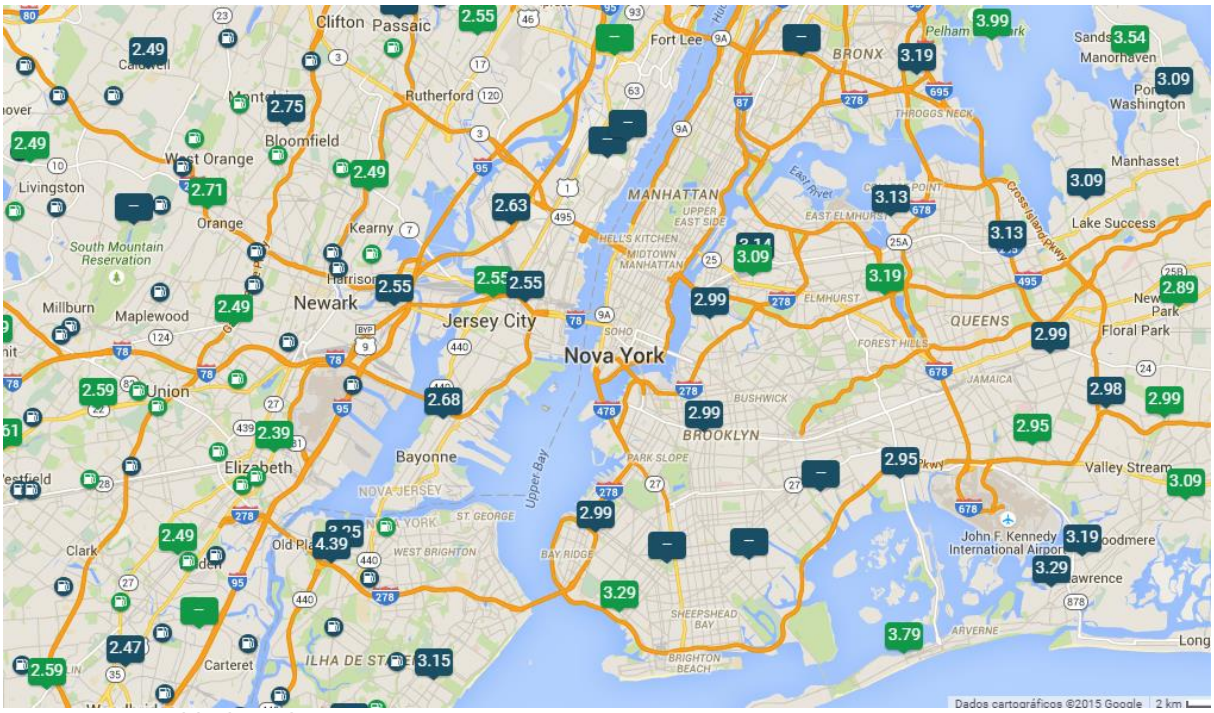
Com o Fuel & Route é possível determinar a melhor rota porta-a-porta e recomendações de abastecimento alinhadas com as preferências e requisições dos motoristas. O programa ainda inclui as funções de redução das distâncias OOR, prevenção contra paradas desnecessárias, hora prevista de chegada e quilometragem OOR em tempo real. As funções do programa ainda incluem a maximização de economia de gasto com combustível (MANH, 2015).

Para a categoria dos sítios eletrônicos, ou *websites,* aparecem o TruckMaster FuelFinder, GasBuddy e o Preço dos Combustíveis. O Truckmaster FuelFinder é uma ferramenta que lista os atuais preços do combustível diesel nos postos de

abastecimento entre dois pontos, ou em cada posto dentro de um raio de 160 quilômetros em torno de uma cidade. Com ele é possível classificar os resultados por preço, serviços disponíveis ou distância, e acessar mapas e serviços disponíveis em cada local (FINDFUELSTOPS, 2015).

Segundo GasBuddy (2015), o programa é um comparador de preços entre postos de abastecimento no qual os próprios usuários, cerca de 30 milhões, atualizam os preços dos combustíveis nos Estados Unidos e Canadá. Especialistas da empresa interpretam esses valores e disponibilizam análises e comparativos.

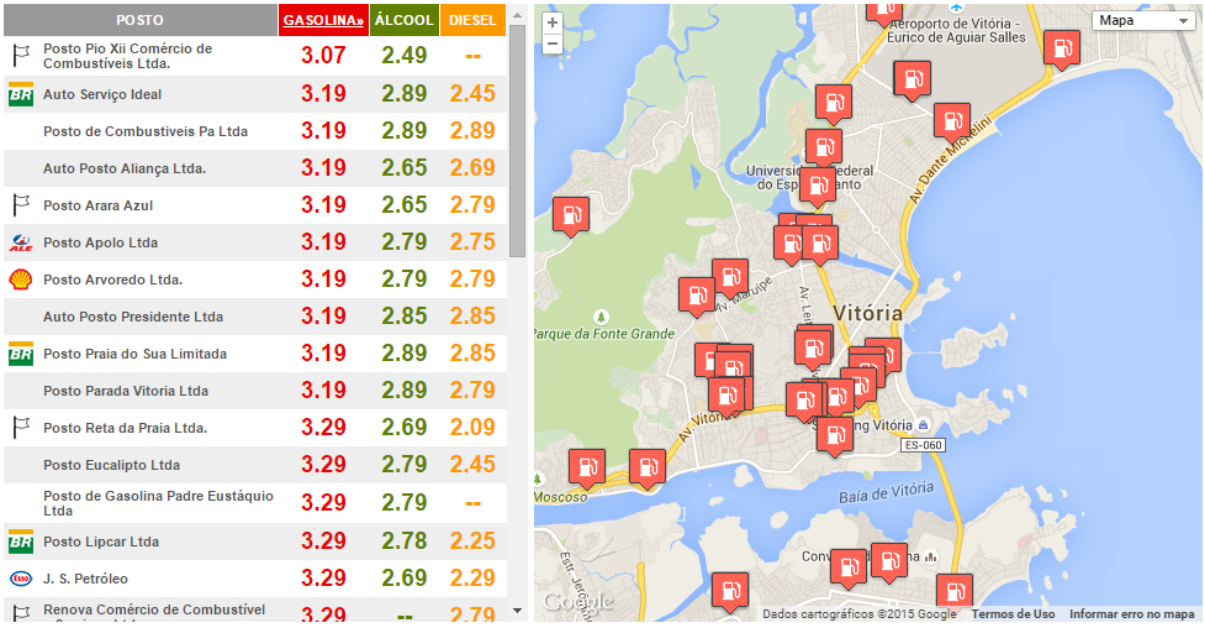
Figura 8: Visão geral para o caso da cidade de Nova Iorque, EUA.



Fonte: GasBuddy (2015).

O Preço dos Combustíveis é um sistema que permite ao usuário consultar o preço praticado pelos postos de abastecimento. A ferramenta contém um mapa interativo que permite navegar em uma localidade listando os postos da área, com seus respectivos preços de gasolina, álcool e diesel. O sistema é atualizado semanalmente utilizando dados fornecidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Além do mapa interativo, os preços podem também ser acessados através da lista de estados e cidades (PREÇO DOS COMBUSTÍVEIS, 2015).

Figura 9: Visão geral do Preço dos Combustíveis para a cidade de Vitória.



POSTO	GASOLINA	ÁLCOOL	DIESEL
Posto Pio Xii Comércio de Combustíveis Ltda.	3.07	2.49	--
Auto Serviço Ideal	3.19	2.89	2.45
Posto de Combustiveis Pa Ltda	3.19	2.89	2.89
Auto Posto Aliança Ltda.	3.19	2.65	2.69
Posto Arara Azul	3.19	2.65	2.79
Posto Apolo Ltda	3.19	2.79	2.75
Posto Arvoredo Ltda.	3.19	2.79	2.79
Auto Posto Presidente Ltda	3.19	2.85	2.85
Posto Praia do Sua Limitada	3.19	2.89	2.85
Posto Parada Vitoria Ltda	3.19	2.89	2.79
Posto Reta da Praia Ltda.	3.29	2.69	2.09
Posto Eucalipto Ltda	3.29	2.79	2.45
Posto de Gasolina Padre Eustáquio Ltda	3.29	2.79	--
Posto Lipcar Ltda	3.29	2.78	2.25
J. S. Petróleo	3.29	2.69	2.29
Renova Comércio de Combustível	3.29	--	2.79

Fonte: Preço dos Combustíveis (2015).

Finalmente, na categoria dos aplicativos para *smartphones*, encontramos o Waze e o Iveco Brasil. O Waze é um aplicativo de trânsito e navegação com objetivo de reduzir tempos de viagem e custos com combustíveis em uma determinada rota. Apesar da principal funcionalidade do aplicativo ser a de propor a melhor rota considerando acidentes, perigos, polícia e engarrafamentos, o programa é capaz de mostrar qual é o posto de combustível mais barato dentro de uma rota selecionada (WAZE, 2015).

Segundo a IVECO (2015), o aplicativo Iveno Brasil é capaz de definir a melhor rota até um destino e calcular qual será o gasto com combustível para essa rota, inclusive com filtros para postos que disponibilizam certos tipos especiais de combustíveis.

No Quadro 2 pode-se encontrar quais são esses programas, suas áreas de atuação e seus principais objetivos.

Quadro 2: *Softwares* para tomadas de decisão da política de reabastecimento.

Nome	País de Origem	Base de Dados	Objetivo	Plataforma
ProMiles	EUA	EUA e Canada	Otimizador de compra de combustível.	Software
IDSC Expert Fuel	EUA	EUA	Otimizador de combustível específico para caminhões.	Software
Fuel & Route	EUA	EUA	Determinar o roteamento ideal e otimizar o combustível enquanto equilibra solicitações e preferências dos motoristas.	Software
TruckMaster Fuel Finder	EUA	EUA e Canada	Relacionar os preços dos combustíveis mais baratos entre dois pontos, sem garantir a sua precisão.	Web
GasBuddy	EUA	EUA e Canada	Encontrar o melhor preço do combustível.	Web
Preço dos Combustíveis	Brasil	Brasil	Comparar o preço dos combustíveis nos postos.	Web, Android e IOS
Waze	EUA	Mundial	Mostrar o posto de combustível mais barato dentro de uma rota.	Android, IOS e Windows Phone
Iveco Brasil	Brasil	Brasil	Definir a melhor rota entre um ponto e outro e calcular o gasto com combustível em uma rota.	Android e IOS

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Após análise detalhada, não foi encontrado nenhum modelo de programação ou programa computacional de política de reabastecimento de veículos rodoviários transportadores de carga que utilize como parâmetro de decisão o impacto da qualidade do pavimento das vias.

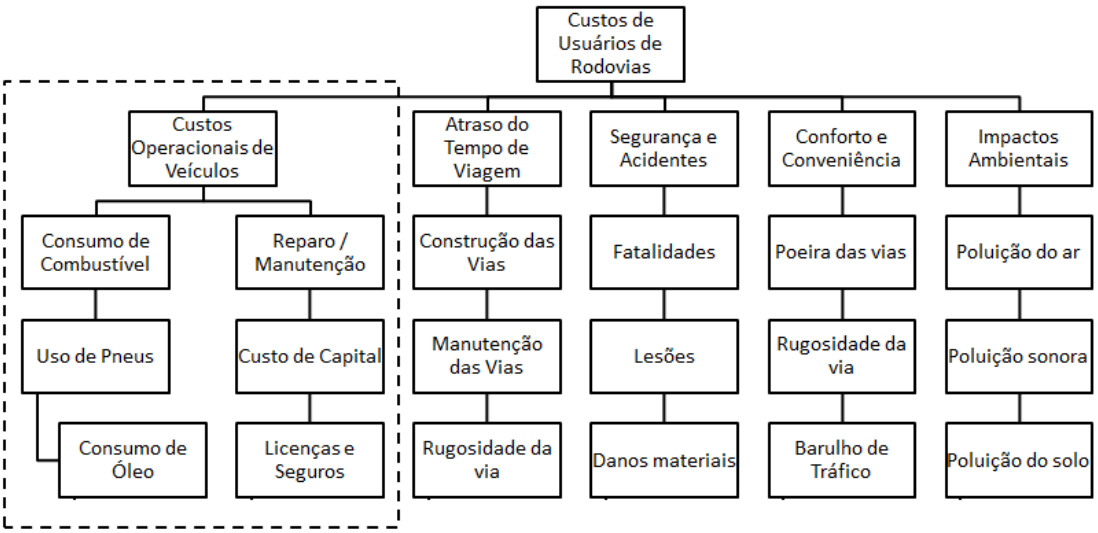
2.3 IMPACTO DA QUALIDADE DO PAVIMENTO DAS VIAS NOS CUSTOS OPERACIONAIS DOS VEÍCULOS

Os custos de transportes em uma rodovia podem ser divididos em duas categorias: custo das agências do governo e custos diretamente ligados aos usuários. Os custos das agências governamentais incluem os projetos, a construção e a manutenção da

via. Os custos dos usuários incluem todos os custos de se operar um veículo em uma rodovia desde sua aquisição, registro, licenciamento, taxas, seguros, depreciação, combustível, pneus, manutenção, entre outros (ZANIEWSKI, 1989).

Chatti e Zaabar (2012) acrescentam ainda aos custos de transporte os custos relacionados aos atrasos nos tempos de viagem, segurança, conforto e conveniência, e impactos ambientais. Na Figura 10 observa-se os componentes relacionados aos custos de transporte dos usuários.

Figura 10: Componentes dos custos dos usuários de rodovias.



Fonte: Adaptado de Chatti e Zaabar (2012).

Dentro dos custos ligados aos usuários, existem os custos considerados variáveis, que são aqueles custos que crescem diretamente ligados a quilometragem percorrida pelo veículo. Dentro desses custos pode-se destacar combustível, pneus, manutenção/reparos e alguma parte da depreciação (BARNES, 2003).

Segundo Chatti e Zaabar (2012), usualmente, cada um desses componentes de custos são modelados separadamente e depois somados para se obter o custo operacional total de um veículo. Um dos fatores de impacto comuns a esses componentes é a rugosidade das vias, usada para representar a qualidade do pavimento. O principal parâmetro de rugosidade de uma via é o *International Roughness Index* (IRI).

O IRI é uma escala de rugosidade baseada em uma resposta simulada de um veículo genérico para a rugosidade no caminho de uma roda na superfície de uma

via. Seu valor é determinado pela obtenção das medidas do perfil da via, processadas através de um algoritimo que simula o modo como um veículo de referência iria responder para as entradas de rugosidade. O índice é normalmente apresentado em polegadas por milha ou metros por quilômetro (MDT, 2007).

Os modelos para determinação dos custos operacionais dos veículos (VOC) contam com levantamentos, modelagem mecanicista e análises estatísticas (BEIN, 1993). VOC são os modelos mais reconhecidos com relação aos custos de usuários pois tipicamente envolvem as despesas associadas a aquisição, operação e manutenção do veículo (LEWIS, 1999).

Segundo Lewis (1999), as medições dos VOC envolvem identificar a quantidade de cada tipo de recurso consumido no serviço de transporte (recursos necessários para dirigir o veículo de um ponto a outro) e o custo unitário do consumo do recurso, que são custos marginais, impostos, subsídios e outros.

Os principais modelos são:

- HDM 3 – World Bank Highway Design and Maintenance Standards Model
- COBA 9 – The British Cost Benefits Analysis Program
- VETO – Swedish Road and Traffic Research Institute
- NIMPAC – National Association of Australian State Road Authorities
- ARFCOM – Australian Road Research Board Road Fuel Consumption Model
- TRDF – The Texas Research and Development Foundation
- HDM 4 – World Bank Highway Design and Maintenance Standarts Model

O modelo HDM 3 foi desenvolvido para atender as necessidades de autoridades rodoviárias, particularmente em países em desenvolvimento, para avaliar políticas, padrões e programas de construção e manutenção de rodovias. O modelo simula as condições de um ciclo de vida e custos para uma rodovia, um grupo de rodovias com características similares, ou uma rede inteira de rodovias, pavimentadas ou não. Os custos primários incluem os custos de construção e manutenção da rodovia e os

custos operacionais dos veículos, para os quais custos de tempo de viagem podem ser adicionados (WORLD BANK, 2014).

O modelo COBA compara os custos de prover regimes de estradas com benefícios derivados dos usuários em termos de tempo, custos operacionais dos veículos e acidentes, expressando os resultados em termos de uma avaliação financeira (COBA, 2002). O modelo trabalha com quatro tipos representativos de veículos: automóvel, van, caminhão à diesel e ônibus. Os efeitos do gradiente e curvatura das rodovias entram no modelo indiretamente através de seus efeitos no fluxo e velocidade dos veículos (LEWIS, 1999).

Segundo Bein (1993), o modelo VETO é baseado na modelagem física dos fatores causais. Portanto sua calibração é adequada para condições das rodovias, operação do veículo, característica do veículo e comportamento do motorista. Apesar de ser detalhado e requerer uma grande quantidade de informações de entrada, o VETO pode ser útil para análises que requerem mais dados agregados. Algumas de suas relações ainda requerem validação, como o impacto da rugosidade das vias no consumo de combustível.

O modelo NIMPAC, foi desenvolvido entre 1968 e 1973 a partir de uma mescla de estudos domésticos e estrangeiros. Suas estimativas são consideradas bastante realistas para as condições rurais da Austrália e consistente com outros estudos internacionais provavelmente em função de sua constante atualização dos tipos de veículos e custos unitários (BEIN, 1993).

Segundo Lewis (1999), o ARFCOM é outro modelo australiano capaz de estimar o consumo de combustível com base nas mudanças de velocidade provocadas por curvas, gradientes ou trânsito. As informações necessárias são os parâmetros dos veículos como massa, potência do motor, número de eixos, tipo de pneu, área frontal e coeficientes aerodinâmicos.

O modelo TRDF surgiu de uma investigação sobre a influência dos desenhos das rodovias e da condição do pavimento nos consumos operacionais e outros custos. O modelo recolheu dados nos Estados Unidos para todas as classes de veículos através de experimentos (BEIN, 1993).

O HDM 4 é o modelo mais recente encontrado na literatura. O modelo possui os objetivos de selecionar alternativas de investimento considerando as características geométricas e de pavimentação das rodovias; e minimizar os custos dos usuários incluindo custos de transporte, congestionamento, emissões, tempo de trajeto e acidentes (ODOKI, 2015).

No Quadro 3 é possível encontrar um resumo das características dos modelos VOC apresentados.

Quadro 3: Resumo das características dos modelos VOC.

Característica	Modelos VOC						
	HDM 3	COBA9	VETO	NIMPAC	ARFCOM	TRDF	HDM 4
Empírico	X	X	-	X	-	X	-
Mecânico	X	-	X	-	X	-	X
Nível de Agregação							
Simulação	-	-	X	-	X	-	X
Nível de Projeto	X	X	X	X	X	X	X
Nível de Rede	X	X	-	X	X	-	X
Operação do Veículo							
Velocidade Uniforme	X	X	X	X	X	X	X
Curvas	X	-	X	X	X	X	X
Mudança de Velocidade	-	-	X	X	X	X	X
Mudança de Marchas	-	-	X	X	X	X	X
Veículos Típicos							
Padrão	X	X	X	X	X	X	X
Especificação de Usuário	X	-	X	-	X	-	X
Caminhão Moderno	X	-	X	X	X	-	X
Variáveis Relativas à Rodovia							
Gradiente	X	X	X	X	X	X	X
Curvatura	X	X	X	X	X	X	X
Superelevação	X	-	X	-	X	-	X
Rugosidade	X	-	X	X	X	X	X
Tipo de Pavimento	X	-	X	X	X	-	X
Textura	-	-	X	-	X	-	X
Neve e Água	-	-	X	-	X	-	X
Vento. Temperatura	-	-	X	-	X	-	X
Elevação Absoluta	X	-	X	-	X	-	X
Componentes VOC							
Combustível. Óleo. Pneus. Reparo / Manutenção. Depreciação.	X	X	X	X	X	X	X
Juros	X	-	X	X	-	-	X
Avarias na Carga	-	-	X	-	-	-	-
Despesas Gerais.	X	X	X	-	-	-	-
Estoque da Frota.	-	X	X	-	-	-	-
Emissões.	-	-	X	-	-	-	X

Fonte: Adaptado de Chatti e Zaabar (2012).

Com base no que foi apresentado neste capítulo, será apresentado um modelo desenvolvido de política de reabastecimento de veículos para rota fixa baseado no modelo apresentado por Rodrigues e Cruz (2013) com a inclusão de uma nova restrição de impacto da qualidade do pavimento nos custos operacionais.

3 MODELO DA POLÍTICA DE REABASTECIMENTO PROPOSTO

Segundo a taxionomia proposta por Vergara (2004), uma pesquisa pode ser classificada em relação a dois aspectos: quanto aos fins e quanto aos meios de investigação.

A presente pesquisa, quanto aos fins, se encaixa na categoria aplicada, pois tem a necessidade de resolver problemas que já existem nas diversas empresas de transporte do país.

Quanto aos meios de investigação, a pesquisa pode ser classificada como bibliográfica, porque toda a fundamentação teórico-metodológica do trabalho foi realizada baseada em materiais publicados; e experimental, já que o modelo produzido permite observar e analisar um fenômeno através da manipulação de variáveis.

Toda a formulação matemática e sua solução foi rodada em um computador com 8GB de memória RAM e um processador Intel i5 de 2,67 GHz.

A coleta de dados foi feita através de informações de órgãos fiscalizadores, como a ANP, pesquisa bibliográfica e sítios eletrônicos especializados.

3.1 TIPO DE MODELAGEM MATEMÁTICA

Buscando desenvolver um modelo de otimização, foi utilizado como referência o modelo proposto por Rodrigues e Cruz (2013), visto que foi o único modelo encontrado que aborda o problema do reabastecimento de combustíveis para a situação das rodovias brasileiras.

Em função das características da aplicação do modelo em rotas de longas distâncias, nas quais a definição da rota é realizada antes da viagem, e da pouca oferta de rodovias com capacidade de atendimento a veículo de carga pesada com segurança, definiu-se pela aplicação de um modelo de rota fixa, o qual, por não ter característica NP *hard*, pode ser facilmente adaptado a uma aplicação prática para as transportadoras ou caminhoneiros.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Para apresentação da modelagem matemática, primeiramente são apresentadas as variáveis consideradas. As variáveis foram caracterizadas como relativas à rota, relativas ao veículo ou de resposta. As variáveis de resposta incluem a quantidade de combustível a ser abastecida em cada ponto de abastecimento; a quantidade de combustível no tanque; o custo operacional do veículo; e o custo total da rota.

3.2.1 Variáveis Relativas à Rota

As variáveis relativas à rota são aquelas que variam apenas quando uma nova rota é selecionada ou quando alguma das características da rota atual é alterada. Elas são independentes das características específicas do veículo de transporte. Encontra-se detalhes delas abaixo:

- Quantidade de pontos contidos na rota selecionada (N): ou seja, quantos postos de abastecimento estão sendo considerados entre a origem e o destino da rota;

- Distância entre os postos de abastecimento (DIS): distância, em quilômetros, de um segmento ou entre um posto de abastecimento e o posto de abastecimento subsequente;

- Preço do combustível no posto de abastecimento (C): valor monetário (R$/l) cobrado para o abastecimento com o combustível diesel em um posto da malha;

- Impacto da pavimentação no consumo de combustível (IPC): fator de acréscimo no consumo de combustível em um determinado segmento. Item relacionado à qualidade da pavimentação.

- Impacto da pavimentação no custo com pneus (IPP): fator de acréscimo no custo com pneus, câmaras e recapagens em um determinado segmento. Item relacionado à qualidade da pavimentação.

- Impacto da pavimentação no custo com reparos e manutenção (IPM): fator de acréscimo no custo com reparos e manutenção em um determinado segmento. Item relacionado à qualidade da pavimentação.

3.2.2 Variáveis Relativas ao Veículo

As variáveis relativas ao veículo são aquelas que variam para cada tipo de veículo que será responsável pelo transporte em uma determinada rota. Independentemente das características das rotas, essas variáveis não se alteram:

- Quantidade máxima de combustível (QMAX): é a quantidade máxima de combustível, em litros, que o veículo pode carregar em qualquer momento. Está ligada à capacidade de armazenagem do tanque de combustível do veículo;

- Quantidade de combustível na origem e no destino (QIEF): é a quantidade de combustível, em litros, que deve estar disponível no tanque tanto no ponto de origem quanto no ponto de destino da rota. Esse valor deve ser o mesmo buscando não se beneficiar da diminuição da quantidade de combustível do tanque no custo total da rota;

- Quantidade de combustível de segurança (QSEG): é a quantidade de combustível mínima, em litros, que deve ser mantida no tanque a qualquer momento durante o cumprimento da rota;

- Consumo de combustível (CCO): é a taxa de consumo de combustível (l/km) do veículo em pavimentos com condições ideais;

- Custo relacionado a pneus (CPN): é o custo variável (R$/km) do veículo relacionado aos itens de pneus, câmaras e recapagens em pavimentos com condições ideais;

- Custo relacionado a reparos e manutenções (CRM): é o custo variável (R$/km) do veículo relativo aos itens de reparos e manutenções em pavimentos com condições ideais. Nesse item incluem-se as manutenções e

reparos gerais além dos gastos com ARLA 32, óleo de carter, lavagens e graxas.

3.2.3 Variáveis de Resposta

As variáveis que são geradas automaticamente pelo modelo são chamadas de variáveis de resposta. São elas que serão utilizadas pelas transportadoras ou motoristas em busca da obtenção da redução de custo. São elas:

- Quantidade de combustível a ser abastecida (q): é a quantidade de combustível, em litros, que deve ser abastecida em cada posto de combustível da rota;
- Quantidade de combustível no tanque (comb): quantidade de combustível, em litros, disponível no tanque em cada posto da rota após o abastecimento ser realizado;
- Custo operacional do veículo (CO): é o custo operacional do veículo, em reais, em cada segmento que ele percorre. Está relacionado aos custos com pneus e reparos e os impactos da pavimentação nos mesmos;
- Custo total da rota (custo_total): é o custo total, em reais, que um determinado veículo terá para percorrer uma rota selecionada.

3.3 LIMITAÇÕES DO MODELO

O modelo matemático considerado possui as seguintes limitações quando comparado com outros modelos disponíveis na literatura:

- Os preços do combustível não se alteram após o veículo iniciar a rota, ou seja, caso algum posto de abastecimento altere o valor do seu combustível durante uma determinada rota, será considerado o valor inicial;

- Os postos de abastecimento selecionados não podem apresentar falta de combustível e possuem combustível com a mesma qualidade;
- Não foram consideradas rotas alternativas contendo maiores distâncias, ou seja, pode existir uma rota mais distante, porém que apresente menor custo total.

3.4 MODELO DO IMPACTO DO PAVIMENTO NOS CUSTOS OPERACIONAIS

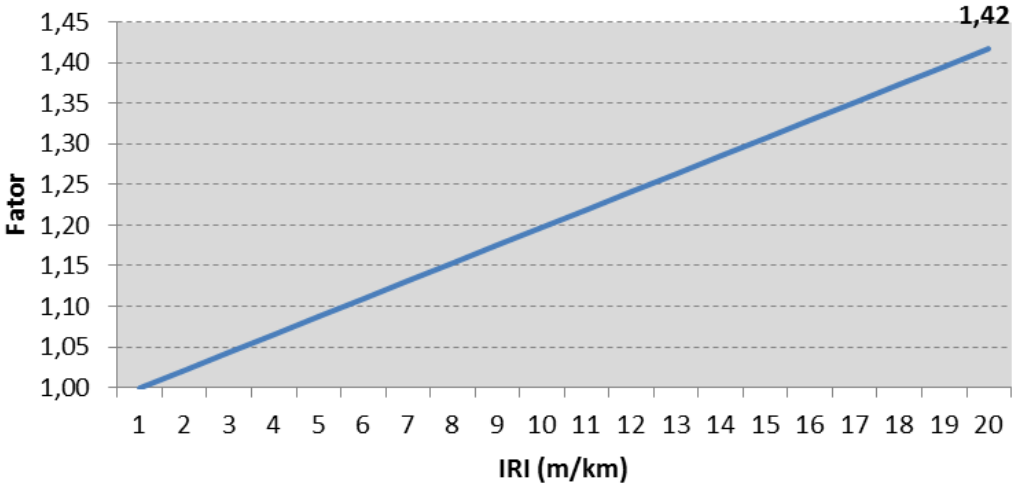
Os dados sobre a qualidade dos pavimentos dos segmentos das rotas a serem modeladas foi retirado da Pesquisa CNT de Rodovias. Essa pesquisa é “uma avaliação criteriosa sobre o estado de conservação e sobre as condições de trafegabilidade, indicando os problemas no pavimento, na sinalização e na geometria das vias” (CNT, 2014, p.7). O levantamento contido engloba grande parte da malha rodoviária brasileira, incluindo toda a malha federal pavimentada.

A avaliação é qualitativa e dividida em 5 categorias: Ótimo, Bom, Regular, Ruim ou Péssimo; baseado em normas federais e referências técnicas do setor.

O modelo VOC selecionado para utilização foi o HDM 4 em função de ser o modelo mais recente existente na literatura, incluir a maior gama de características validadas e possibilitar adaptação às três variáveis do custo operacional definidas: combustível, pneus e reparos e manutenções. Conforme discutido na revisão bibliográfica, usualmente nos modelos VOC, a qualidade de uma rodovia está relacionada ao seu IRI, que varia numa faixa de 0 a 20.

Os Gráficos 7, 8 e 9 mostram os fatores de impacto da pavimentação nos custos operacionais dos veículos para um caminhão pesado, confome Chatti e Zaabar (2012).

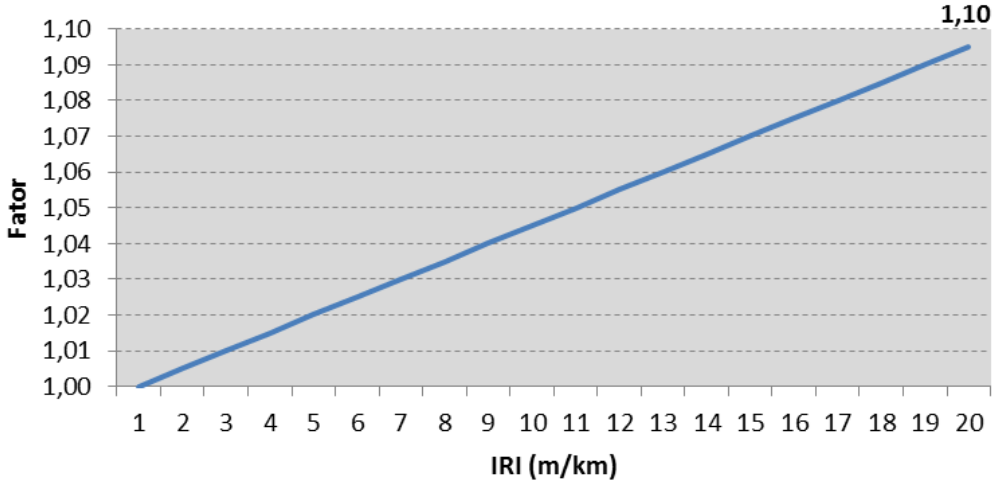
Gráfico 7: Impacto da pavimentação no consumo de combustível.



Fonte: Adaptado de Chatti e Zaabar (2012).

O impacto, ou fator multiplicador, da pavimentação no consumo de combustível apresenta um crescimento linear conforme aumenta-se a rugosidade da via. O valor parte de nenhum acréscimo no consumo para uma rugosidade igual à 1 até um acréscimo de 42%, ou fator 1,42, para um IRI igual à 20.

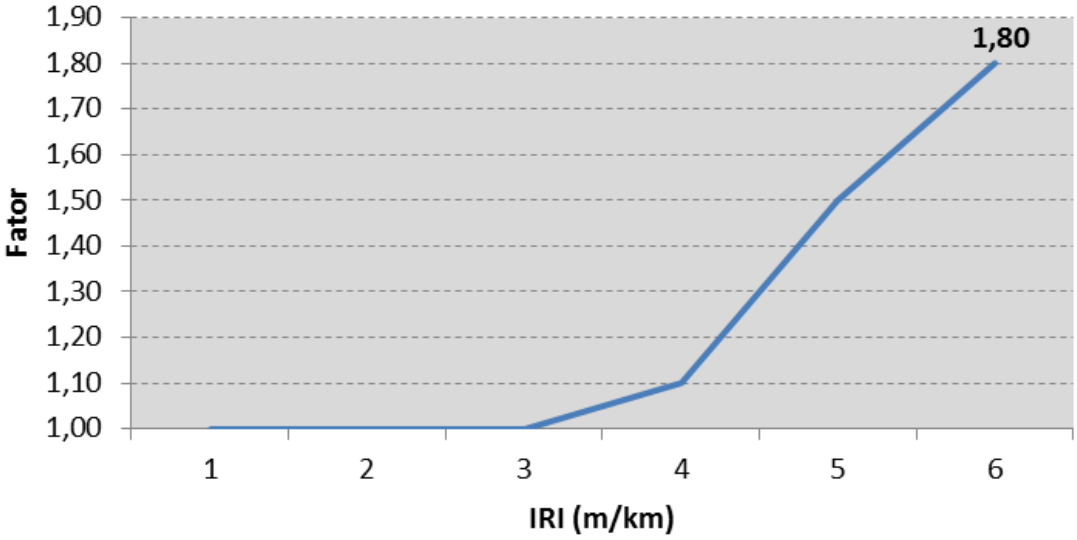
Gráfico 8: Impacto da pavimentação nos custos com pneus.



Fonte: Adaptado de Chatti e Zaabar (2012).

O impacto da pavimentação nos custos relativos com os pneus apresenta um comportamento semelhante ao consumo de combustível, porém apresentando menor variação. O impacto varia de um fator igual a 1,00 para um IRI baixo até o valor máximo de 1,10 para grandes rugosidades.

Gráfico 9: Impacto da pavimentação nos custos com reparos e manutenções.



Fonte: Adaptado de Chatti e Zaabar (2012).

Diferentemente dos impactos anteriores, o fator relativo aos reparos e manutenções apresenta um comportamento exponencial conforme aumenta-se a rugosidade da via. Na pesquisa original o valor máximo de IRI das vias foi de 6 m/km, porém sabe-se que a realidade brasileira é bastante diferente. Com o objetivo de não superestimar esse valor optou-se por fixar o valor determinado de 1,80 para um IRI igual à 6 para todos os IRI superiores.

Para adaptar a métrica utilizada pela pesquisa de Chatti e Zaabar (2012), utilizando o IRI, à métrica utilizada pela CNT, cinco categorias qualitativas, foi utilizada a pesquisa de Reis (2006) que distribui uma faixa de IRI dentro das cinco categorias propostas conforme Quadro 4.

Quadro 4: Faixa de rugosidade por estágio de conservação do pavimento.

Rugosidade (m/km)	Estágio de Conservação do Pavimento
Abaixo de 3	Ótimo
De 3 a 6	Bom
De 6 a 9	Regular
De 9 a 12	Ruim
Acima de 12	Péssimo

Fonte: Adaptado de Reis (2006).

Utilizando a média das faixas de rugosidade para cada estágio de conservação do pavimento: ótimo, bom, deficiente ou regular, ruim e péssimo, e utilizando os gráficos e equações relativas as três dimensões dos custos operacionais dos veículos transportadores rodoviários de carga, foi possível calcular o fator de impacto que será considerado na modelagem. O resultado dos cálculos encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2: Fator de Impacto por qualidade de pavimento para as três dimensões de custos operacionais.

Qualidade do Pavimento	Fator de Impacto		
	Reparo e Manutenção	Pneus	Combustível
Ótimo	1,00	1,00	1,01
Bom	1,20	1,02	1,07
Regular	1,80	1,03	1,13
Ruim	1,80	1,05	1,20
Péssimo	1,80	1,08	1,33

Fonte: Elaborado pelo Autor (2015).

As informações da Tabela 6 são relativas as variáveis IPC, IPP e IPM. Ou seja, supondo um segmento que tenha uma qualidade regular de pavimentação, os custos com reparo e manutenção para esse segmento serão 1,80 vezes o valor base para essa dimensão. Para esse mesmo segmento, os custos com pneus serão 1,03 vezes o valor base e os custos com combustíveis serão 1,13 vezes o valor referência da dimensão.

3.5 MODELAGEM DO PROBLEMA

Segue abaixo a modelagem matemática desenvolvida para resolução do problema proposto:

$$Minimizar\ custo_total\ = \sum_{2}^{n}\left(C_j * q_j + CO_j\right) \tag{20}$$

Sujeito à:

$$comb_1 = comb_n = QIEF \tag{21}$$

$$comb_i \leq QMAX \qquad \forall\ i\ \in (1, n) \tag{22}$$

$$comb_k - CCO * IPC_k * DIS_k \geq QSEG \qquad \forall\, k \in (2, n-1) \tag{23}$$

$$comb_j = q_j + comb_{j-1} - CCO * IPC_{j-1} * DIS_{j-1} \qquad \forall\, j \in (2, n) \tag{24}$$

$$CO_j = DIS_{j-1} * IPP_{j-1} * CPN + DIS_{j-1} * IPM_{j-1} * CRM \qquad \forall\, j \in (2, n) \tag{25}$$

$$q_j; CO_j \geq 0 \quad \forall\, j \in (2, n) \tag{26}$$

$$comb_i \geq 0 \quad \forall\, i \in (1, n) \tag{27}$$

Onde:

n = número de cidades da rota;
custo_total = Custo total da rota (R$);
C = preço do combustível no posto de abastecimento (R$/l);
q = quantidade de combustível a ser abastecida (l);
CO = custo operacional do veículo (R$);
comb = quantidade de combustível no tanque (l);
QIEF = quantidade de combustível na origem e no destino (l);
QMAX = quantidade máxima de combustível (l);
CCO = consumo de combustível (l/km);
IPC = impacto da pavimentação no consumo de combustível;
DIS = distância entre os postos de abastecimento (km);
QSEG = quantidade de combustível de segurança (l);
IPP = impacto da pavimentação no custo com pneus;
CPN = custo relacionado a pneus (R$/km);
IPM: impacto da pavimentação no custo com reparos e manutenção;
CRM = custo relacionado a reparos e manutenções (R$/km).

A função objetivo dada pela Equação (20) minimiza o custo total de reabastecimento do combustível considerando o quanto será abastecido em cada posto disponível ao longo da rota. A restrição (21) garante a igualdade entre a quantidade inicial e final de combustível no tanque de combustível. As equações (22) e (23) são restrições relativas à segurança. A restrição (22) garante o não extrapolamento da capacidade

máxima do tanque e a restrição (23) restringe o volume de segurança do veículo. A equação (24) determina o consumo do veículo por segmento percorrido. Os custos operacionais são calculados através da equação (25). As equações (26) e (27) são restrições de não-negatividade.

Importante resaltar que, diferentemente da modelagem proposta por Rodrigues e Cruz (2013), o modelo proposto não utiliza variáveis inteiras. Essa característica tem como objetivo acelerar o processo decisório, visto que técnicas mais simples de resolução de problemas são utilizadas para variáveis reais.

4 APLICAÇÃO DO MODELO

Para analisar os resultados do modelo, foram escolhidas três rotas distintas, todas com origem na capital do Estado do Espírito Santo, Vitória, para comparação do efeito da variação do preço do combustível e da pavimentação em diferentes regiões brasileiras. Todas as rotas possuem aproximadamente a mesma distância, 2.000 quilômetros, e passam por rodovias federais e estaduais dentro de diversos estados e municípios brasileiros.

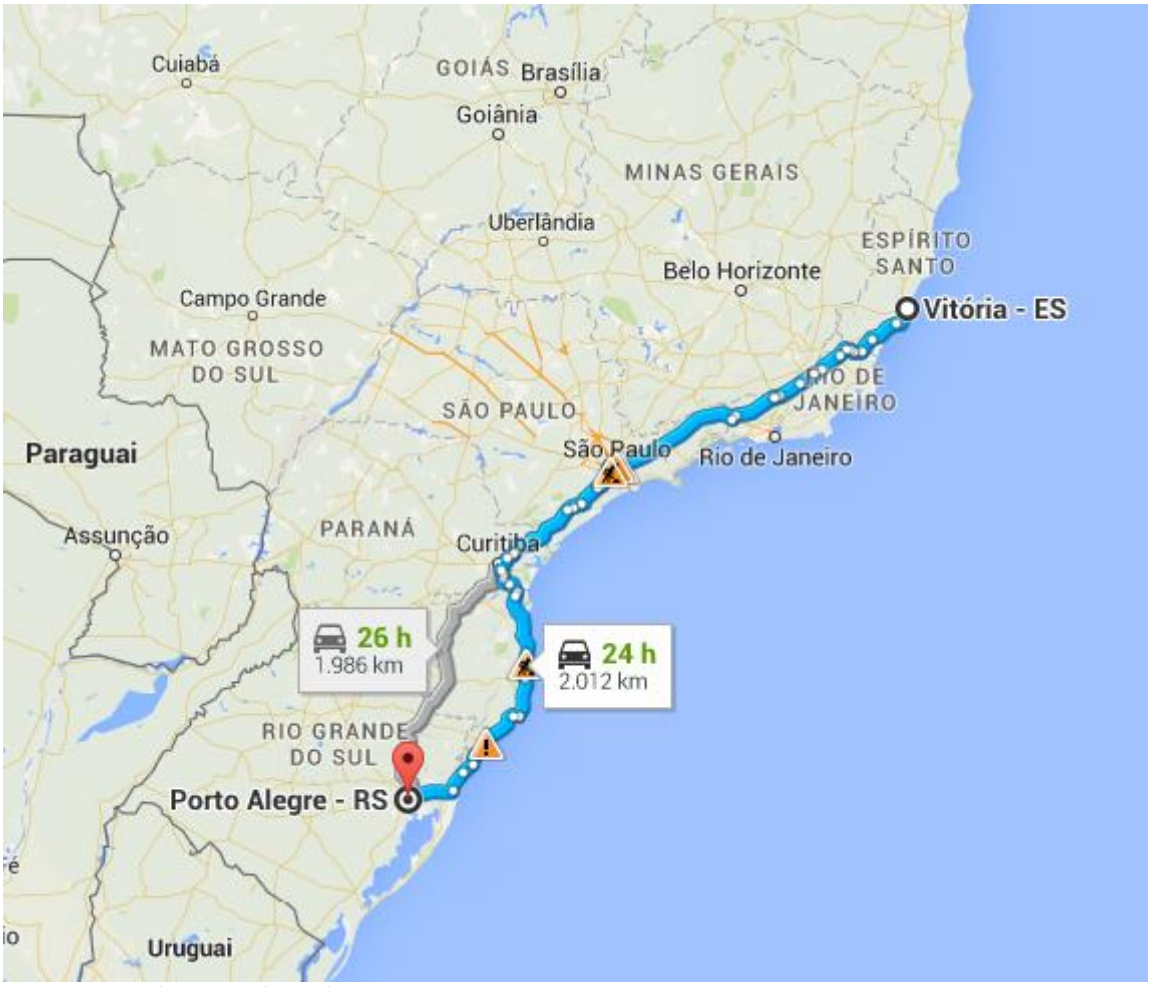
A proposta é, em uma primeira rodada, utilizar o modelo para as 3 rotas não introduzindo a qualidade do pavimento das vias e, por consequência, não avaliando o impacto da pavimentação nos custos totais da rota. Na segunda rodada são introduzidos os valores relativos as características das vias para todas as rotas e realizada uma comparação entre os resultados das duas rodadas.

4.1 ROTAS ESCOLHIDAS

4.1.1 Rota 1: Vitória – Porto Alegre

A primeira rota selecionada possui origem em Vitória e destino em Porto Alegre, Rio Grande do Sul. A rota passa pelos estados do Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Possui comprimento total de 2.011 quilômetros passando principalmente por rodovias federais de ótimo estado. No mapa da Figura 11 pode-se observar, em azul, uma visão geral do trajeto selecionado.

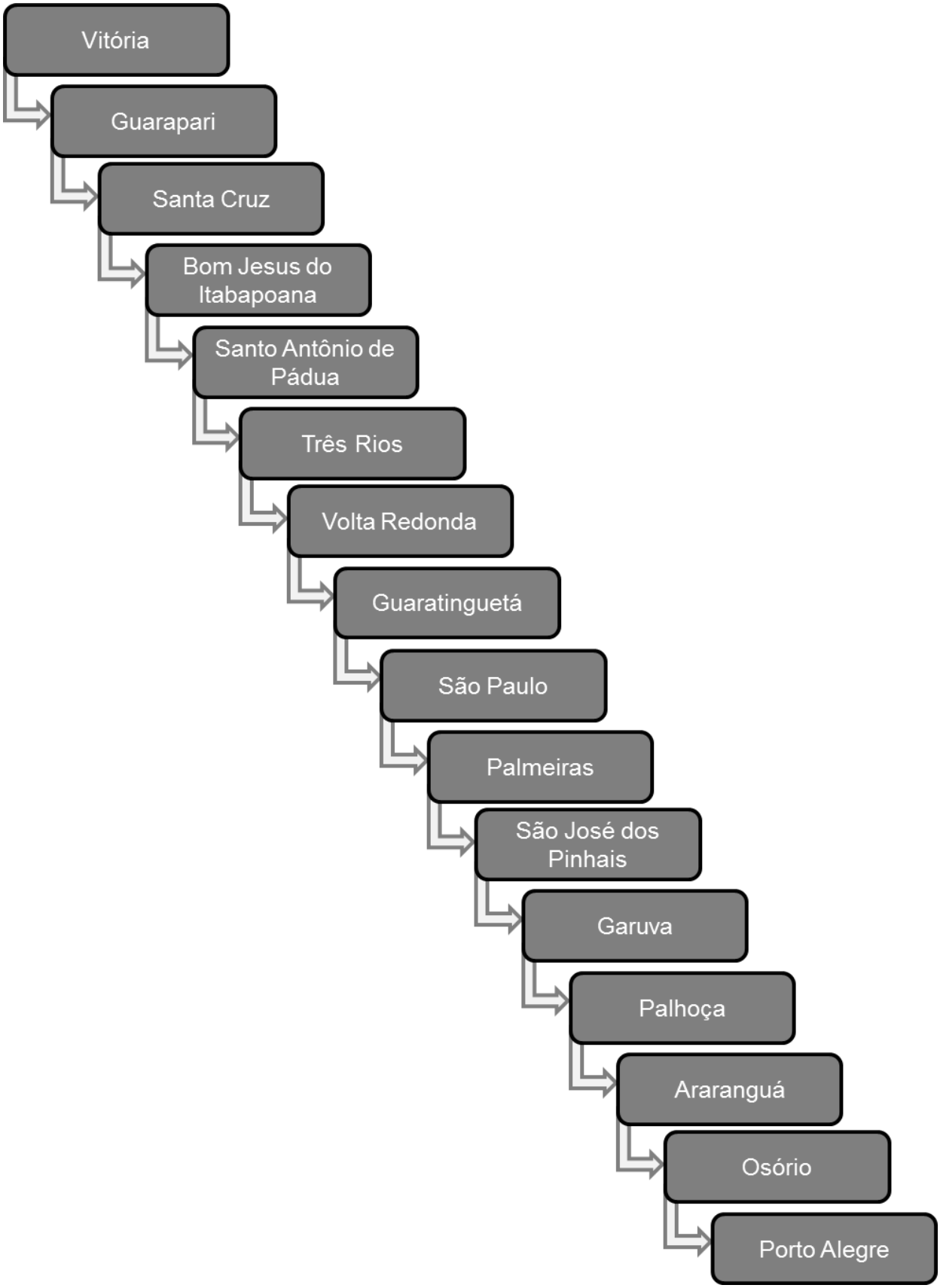
Figura 11: Visão Geral da Rota 1.



Fonte: Google Maps (2015).

Para a primeira rota foram definidos 16 pontos possuindo postos de abastecimento: três localizados no Espírito Santo, quatro no Rio de Janeiro, três em São Paulo, um no Paraná, três em Santa Catarina e dois no Rio Grande do Sul. Na Figura 12, encontram-se todos os pontos de parada desde a origem até o destino na ordenação do caminho do veículo.

Figura 12: Lista de pontos de parada da Rota 1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Considerando as 16 cidades da rota, existem 15 segmentos de rodovias que precisarão ser percorridos pelo caminhão para atingir o seu destino. A Tabela 3 mostra uma visão geral dos segmentos incluindo todos os trajeto entre cidades, qual o tipo de rodovia e sua respectiva numeração, o comprimento do segmento (em quilômetros) e em qual estado da nação está situado a maior parte do trajeto.

Tabela 3: Informações básicas dos segmentos da Rota 1.

Segmento	Origem	Destino	Rodovia	Número	Distância (km)	Estado (maior parte)
1	Vitória	Guarapari	ES	060	53,1	ES
2	Guarapari	Santa Cruz	BR	101	122,7	ES
3	Santa Cruz	Bom Jesus do Itabapoana	ES	297	45,9	ES
4	Bom Jesus do Itabapoana	Santo Antônio de Pádua	BR	393	77,3	RJ
5	Santo Antônio de Pádua	Três Rios	BR	393	146,6	RJ
6	Três Rios	Volta Redonda	BR	393	119,7	RJ
7	Volta Redonda	Guaratinguetá	BR	116	133,0	SP
8	Guaratinguetá	São Paulo	BR	116	167,0	SP
9	São Paulo	Palmeiras	BR	116	186,5	SP
10	Palmeiras	São José dos Pinhais	BR	116	237,3	SP
11	São José dos Pinhais	Garuva	BR	376	74,0	PR
12	Garuva	Palhoça	BR	101	213,5	SC
13	Palhoça	Araranguá	BR	101	198,5	SC
14	Araranguá	Osório	BR	101	135,7	RS
15	Osório	Porto Alegre	BR	290	100,6	RS
TOTAL	**2011,3**					

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Para cada segmento, também foi retirado da pesquisa CNT (2014) as informações relativas à qualidade da pavimentação. Na Tabela 4 encontra-se o resumo dessas informações e os impactos no consumo de combustível e nos custos com pneus e reparos e manutenções para cada trecho destacado.

Tabela 4: Fator de impacto por segmento da Rota 1.

					FATOR DE IMPACTO		
Segmento	Rodovia	Número	Dis. (km)	Pavimentação	Combustível	Pneu	Manutenção
1	ES	060	53,1	Regular	1,13	1,03	1,80
2	BR	101	122,7	Bom	1,07	1,02	1,20
3	ES	297	45,9	Bom	1,07	1,02	1,20
4	BR	393	77,3	Ótimo	1,01	1,00	1,00
5	BR	393	146,6	Ótimo	1,01	1,00	1,00
6	BR	393	119,7	Ótimo	1,01	1,00	1,00
7	BR	116	133,0	Ótimo	1,01	1,00	1,00
8	BR	116	167,0	Ótimo	1,01	1,00	1,00
9	BR	116	186,5	Ótimo	1,01	1,00	1,00
10	BR	116	237,3	Ótimo	1,01	1,00	1,00
11	BR	376	74,0	Bom	1,07	1,02	1,20
12	BR	101	213,5	Bom	1,07	1,02	1,20
13	BR	101	198,5	Bom	1,07	1,02	1,20
14	BR	101	135,7	Regular	1,13	1,03	1,80
15	BR	290	100,6	Bom	1,07	1,02	1,20
TOTAL	2011,3						

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Para cada cidade, ou nó, da rota foram levantados os preços dos combustíveis em todos os postos de abastecimento disponíveis no site da Agência Nacional do Petróleo (ANP). Os dados estatísticos desses valores como preço mínimo, máximo, médio e o desvio padrão da amostragem encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5: Preço do combustível em cada cidade da Rota 1.

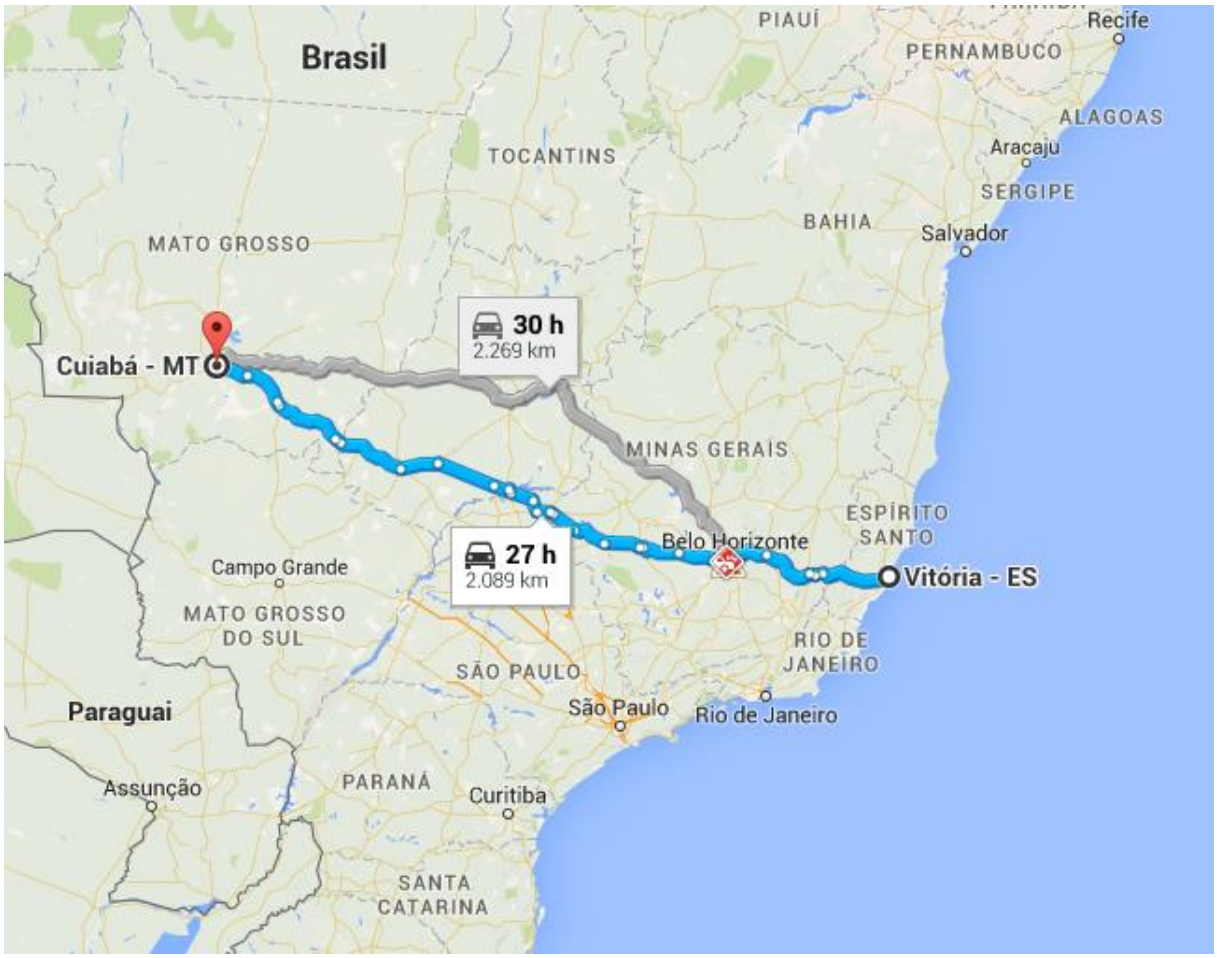
Cidade	Estado	Custo do Combustível (R$)			
		Mín	Máx	Média	Desvio Padrão
Vitória	ES	2,09	3,01	2,61	0,28
Guarapari	ES	2,46	3,09	2,87	0,23
Santa Cruz	ES	2,95	2,95	2,95	0,00
Bom Jesus do Itabapoana	RJ	2,60	2,73	2,70	0,06
Santo Antônio de Pádua	RJ	2,55	2,67	2,62	0,06
Três Rios	RJ	2,05	2,79	2,58	0,35
Volta Redonda	RJ	2,00	2,99	2,60	0,34
Guaratinguetá	SP	2,50	2,91	2,67	0,11
São Paulo	SP	1,99	3,10	2,52	0,26
Palmeiras	SP	2,80	2,80	2,80	0,00
São José dos Pinhais	PR	1,90	2,80	2,50	0,30
Garuva	SC	2,56	2,80	2,70	0,11
Palhoça	SC	2,56	2,90	2,73	0,12
Araranguá	SC	2,11	2,77	2,58	0,21
Osório	RS	2,00	2,92	2,57	0,34
Porto Alegre	RS	1,98	2,90	2,37	0,27

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

4.1.2 Rota 2: Vitória – Cuiabá

A segunda rota escolhida também possui origem em Vitória, porém com destino em Cuiabá, Mato Grosso. A rota corta os estados do Espírito Santo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso. Todo o trajeto, distância total de 2.088 quilômetros, é realizado através de rodovias federais de estado bom e regular. No mapa da Figura 13 pode-se observar, em azul, uma visão geral do trajeto selecionado.

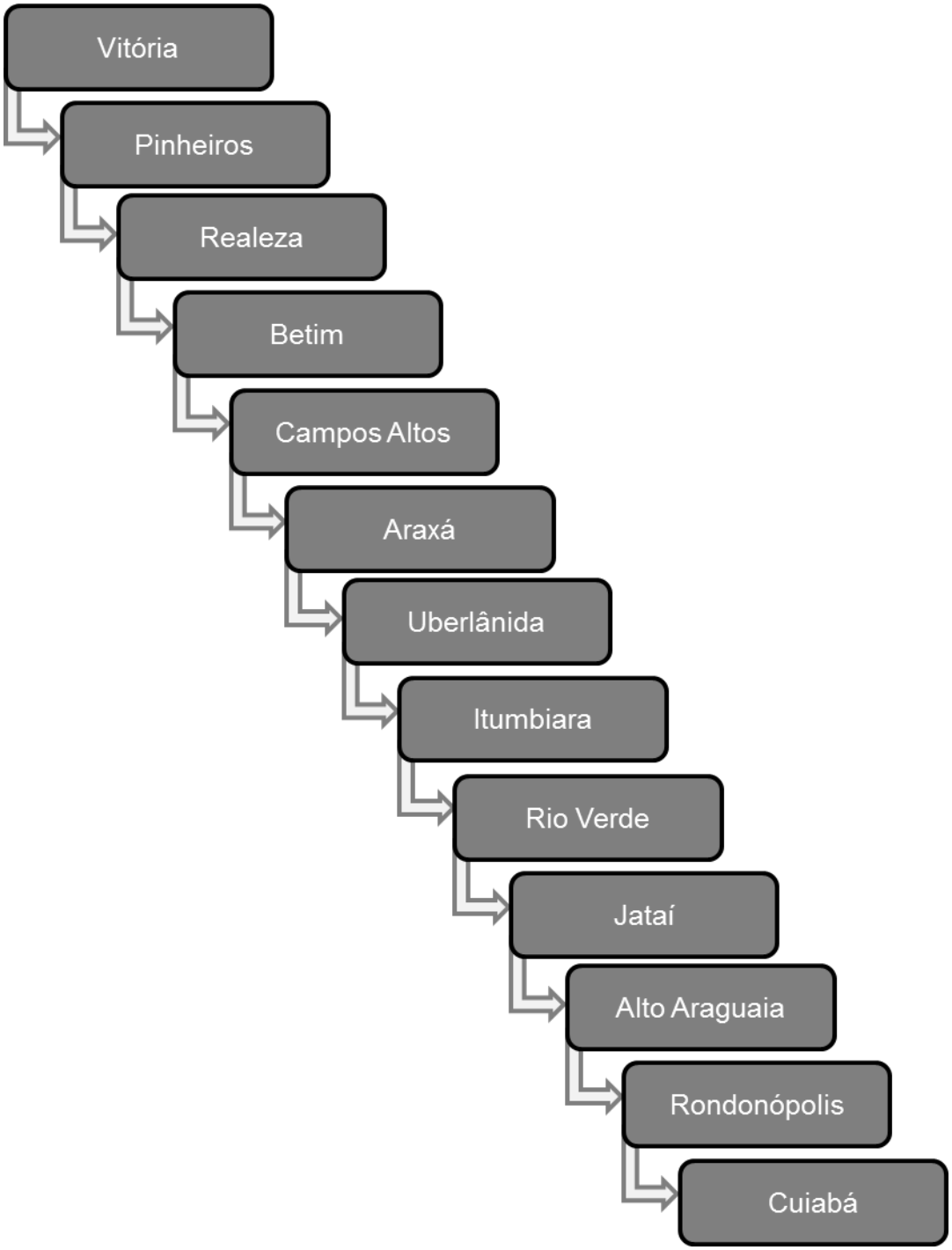
Figura 13: Visão Geral da Rota 2.



Fonte: Google Maps (2015).

No trajeto foram definidas treze cidades possíveis de se realizar o abastecimento: uma localizada no Espírito Santo, seis em Minas Gerais, três em Goiás e três no Mato Grosso. Na Figura 14 encontra-se todos os pontos de parada desde a origem até o destino na ordenação do caminho do veículo.

Figura 14: Lista de pontos de parada da Rota 2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

A rota possui um total de 12 segmentos de rodovias que serão percorridos pelo veículo transportador de carga até seu ponto de despacho. Os dados dos segmentos como tipo de rodovia e sua respectiva numeração, comprimento do segmento (em quilômetros) e estado da nação no qual está situado a maior parte do trajeto estão disponíveis na Tabela 6.

Tabela 6: Informações básicas dos segmentos da Rota 2.

Segmento	Origem	Destino	Rodovia	Número	Distância (km)	Estado (maior parte)
1	Vitória	Pinheiros	BR	262	213,8	ES
2	Pinheiros	Realeza	BR	262	194,8	MG
3	Realeza	Betim	BR	262	141,7	MG
4	Betim	Campos Altos	BR	262	223,0	MG
5	Campos Altos	Araxá	BR	262	108,6	MG
6	Araxá	Uberlândia	BR	452	165,0	MG
7	Uberlândia	Itumbiara	BR	452	142,0	MG
8	Itumbiara	Rio Verde	BR	452	198,0	GO
9	Rio Verde	Jataí	BR	060	96,6	GO
10	Jataí	Alto Araguaia	BR	364	186,0	GO
11	Alto Araguaia	Rondonópolis	BR	364	203,3	MT
12	Rondonópolis	Cuiabá	BR	364	215,5	MT
TOTAL	**2088,2**					

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Assim como na primeira rota, as informações relativas à qualidade da pavimentação para cada trecho foram retiradas da pesquisa CNT (2014). Na Tabela 7 encontra-se o resumo dessas informações e os impactos no consumo de combustível e nos custos com pneus e reparos e manutenções para cada trecho destacado.

Tabela 7: Fator de impacto por segmento da Rota 2.

					FATOR DE IMPACTO		
Segmento	Rodovia	Número	Distância (km)	Pavimentação	Combustível	Pneu	Manutenção
1	BR	262	213,8	Bom	1,07	1,02	1,20
2	BR	262	194,8	Bom	1,07	1,02	1,20
3	BR	262	141,7	Bom	1,07	1,02	1,20
4	BR	262	223,0	Bom	1,07	1,02	1,20
5	BR	262	108,6	Bom	1,07	1,02	1,20
6	BR	452	165,0	Bom	1,07	1,02	1,20
7	BR	452	142,0	Bom	1,07	1,02	1,20
8	BR	452	198,0	Bom	1,07	1,02	1,20
9	BR	060	96,6	Bom	1,07	1,02	1,20
10	BR	364	186,0	Bom	1,07	1,02	1,20
11	BR	364	203,3	Regular	1,13	1,03	1,80
12	BR	364	215,5	Regular	1,13	1,03	1,80

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Para cada município do caminho selecionado foram levantados os preços dos combustíveis em todos os postos de abastecimento. Na Tabela 8 encontram-se os dados estatísticos coletados.

Tabela 8: Preço do combustível em cada cidade da Rota 2.

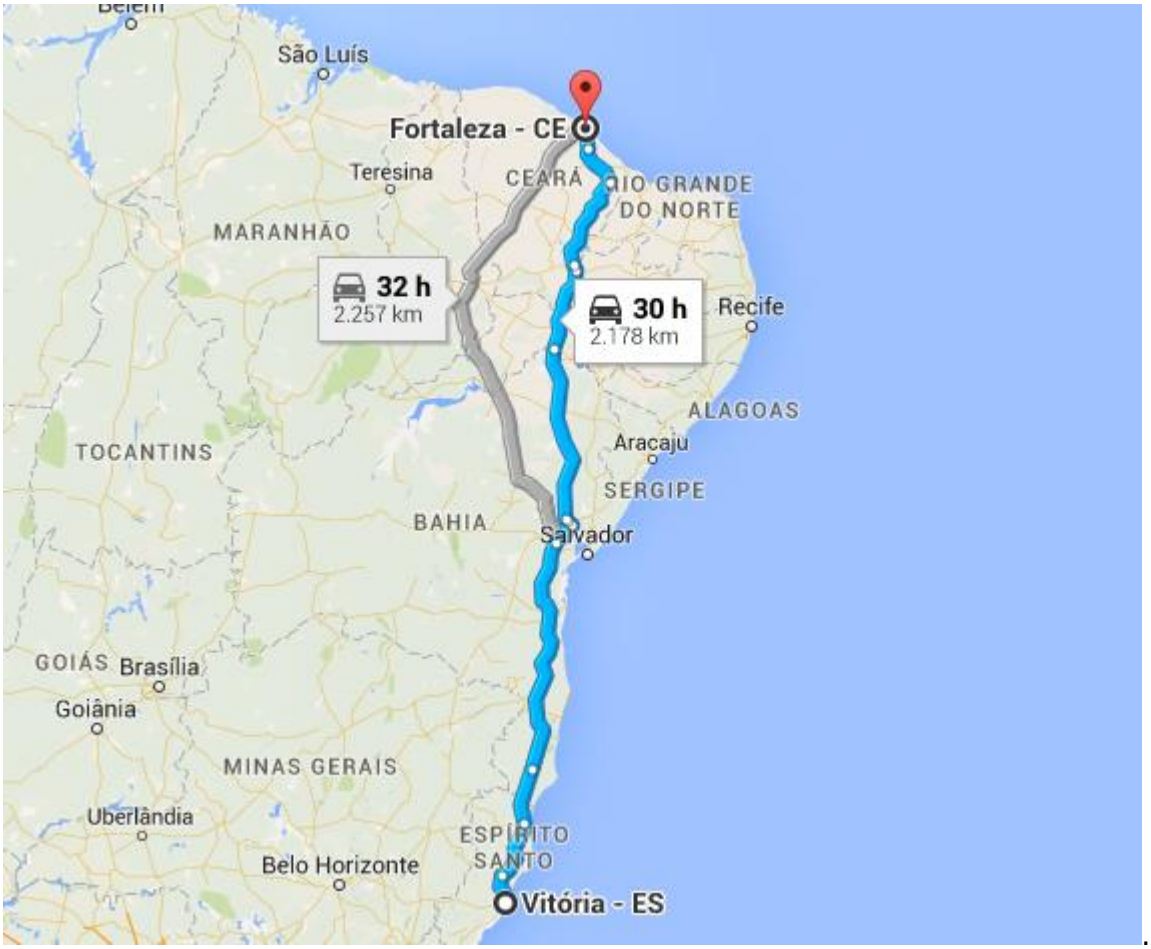
Cidade	Estado	Custo do Combustível (R$)			
		Mín	Máx	Média	Desvio Padrão
Vitória	ES	2,09	3,01	2,61	0,28
Pinheiros	MG	2,73	2,86	2,82	0,05
Realeza	MG	2,00	2,84	2,60	0,40
Betim	MG	2,70	2,95	2,82	0,09
Campos Altos	MG	2,69	2,73	2,72	0,02
Araxá	MG	2,09	2,90	2,46	0,33
Uberlândia	MG	1,90	2,90	2,66	0,22
Itumbiara	GO	2,50	2,92	2,78	0,10
Rio Verde	GO	2,50	2,98	2,81	0,17
Jataí	GO	2,87	3,11	3,00	0,09
Alto Araguaia	MT	2,98	2,98	2,98	0,00
Rondonópolis	MT	2,35	3,15	3,00	0,18
Cuiabá	MT	2,19	3,26	2,93	0,25

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

4.1.3 Rota 3: Vitória – Fortaleza

Finalmente, a terceira e última rota selecionada sai do município de Vitória com destino a região Nordeste do país, terminando em Fortaleza, Ceará. Os estados pertencentes à rota são: Espírito Santo, Bahia, Pernambuco, Paraíba e Ceará. Assim como na Rota 2, todos os 2.177 quilômetros da rota são percorridos utilizando rodovias federais. Porém, na terceira rota, são encontradas rodovias de estado regular, bom e ótimo. Uma visão geral da rota escolhida está destacada em azul na Figura 15.

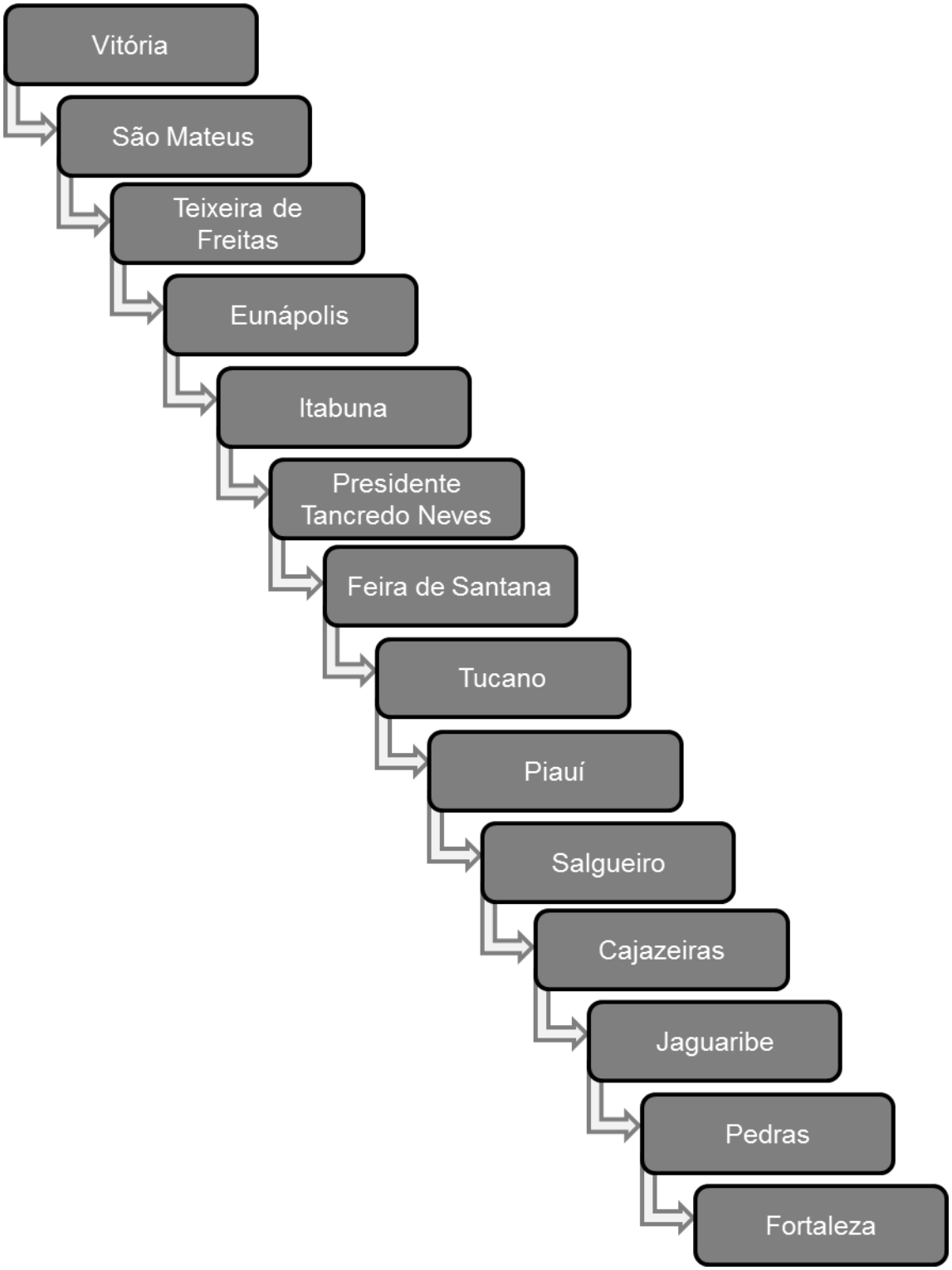
Figura 15: Visão Geral da Rota 3.



Fonte: Google Maps (2015).

Foram selecionados 14 pontos de parada candidatos a se realizar o abastecimento do veículo. Eles estão localizados nos seguintes estados: dois no Espírito Santo, sete na Bahia, um em Pernambuco, um na Paraíba e três no Ceará. Na Figura 16 encontra-se todos os pontos de parada desde a origem até o destino na ordenação do caminho do veículo.

Figura 16: Lista de pontos de parada da Rota 3.



Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

A rota possui um total de 13 trechos rodoviários com detalhamento de suas informações na Tabela 9.

Tabela 9: Informações básicas dos segmentos da Rota 3.

Segmento	Origem	Destino	Rodovia	Número	Distância (km)	Estado (maior parte)
1	Vitória	São Mateus	BR	101	219,4	ES
2	São Mateus	Teixeira de Freitas	BR	101	142,0	BA
3	Teixeira de Freitas	Eunápolis	BR	101	157,0	BA
4	Eunápolis	Itabuna	BR	101	215,0	BA
5	Itabuna	Presidente Tancredo Neves	BR	101	179,0	BA
6	Presidente Tancredo Neves	Feira de Santana	BR	101	162,0	BA
7	Feira de Santana	Tucano	BR	116	166,6	BA
8	Tucano	Piauí	BR	116	200,0	BA
9	Piauí	Salgueiro	BR	116	143,0	PE
10	Salgueiro	Cajazeiras	BR	116	160,0	CE
11	Cajazeiras	Jaguaribe	BR	116	123,0	CE
12	Jaguaribe	Pedras	BR	116	165,0	CE
13	Pedras	Fortaleza	BR	116	145,0	CE
TOTAL					**2177,0**	

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Conforme rotas anteriores, as informações relativas à qualidade da pavimentação para cada trecho foram retiradas da pesquisa CNT (2014). As informações referentes aos impactos no consumo de combustível e nos custos com pneus e reparos e manutenções para cada segmento escolhido podem ser vistas na Tabela 10.

Tabela 10: Fator de impacto por segmento da Rota 3.

					FATOR DE IMPACTO		
Segmento	Rodovia	Número	Distância (km)	Pavimentação	Combustível	Pneu	Manutenção
1	BR	101	219,4	Bom	1,07	1,02	1,20
2	BR	101	142,0	Bom	1,07	1,02	1,20
3	BR	101	157,0	Bom	1,07	1,02	1,20
4	BR	101	215,0	Bom	1,07	1,02	1,20
5	BR	101	179,0	Bom	1,07	1,02	1,20
6	BR	101	162,0	Bom	1,07	1,02	1,20
7	BR	116	166,6	Regular	1,13	1,03	1,80
8	BR	116	200,0	Regular	1,13	1,03	1,80
9	BR	116	143,0	Ótimo	1,01	1,00	1,00
10	BR	116	160,0	Ótimo	1,01	1,00	1,00
11	BR	116	123,0	Ótimo	1,01	1,00	1,00
12	BR	116	165,0	Ótimo	1,01	1,00	1,00
13	BR	116	145,0	Ótimo	1,01	1,00	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Finalmente, para cada ponto candidato de parada da rota levantou-se os preços dos combustíveis em todos os postos de abastecimento disponíveis pela ANP. Na Tabela 11 encontram-se os dados estatísticos desses valores.

Tabela 11: Preço do combustível em cada cidade da Rota 3.

Cidade	Estado	Custo do Combustível (R$)			
		Mín	Máx	Média	Desvio Padrão
Vitória	ES	2,09	3,01	2,61	0,28
São Mateus	ES	2,68	2,83	2,78	0,06
Teixeira de Freitas	BA	2,09	2,98	2,74	0,33
Eunápolis	BA	2,79	2,85	2,83	0,03
Itabuna	BA	2,57	2,85	2,76	0,08
Presidente Tancredo Neves	BA	2,29	2,75	2,53	0,20
Feira de Santana	BA	2,37	2,90	2,65	0,10
Tucano	BA	2,65	2,65	2,65	0,00
Piauí	BA	2,67	2,67	2,67	0,00
Salgueiro	PE	2,65	2,69	2,67	0,02
Cajazeiras	PB	2,67	2,67	2,67	0,00
Jaguaribe	CE	2,41	2,41	2,41	0,00
Pedras	CE	2,15	2,15	2,15	0,00
Fortaleza	CE	1,93	2,20	2,15	0,05

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

4.2 VEÍCULO ESCOLHIDO

Como o problema trata do transporte rodoviário de carga para grandes distâncias, optou-se por escolher um veículo pesado, com capacidade acima de 20 toneladas, para ser utilizado na realização das três rotas. Uma pesquisa realizada pelo GUIADOTRC (2015) apresenta os custos variáveis por quilômetro percorrido de uma série de caminhões pesados usualmente utilizados pelas transportadoras e caminhoneiros brasileiros. Na Tabela 12, encontram-se essas informações.

Tabela 12: Custo varíavel de Veículos Pesados de Carga.

Caminhões Pesados		*Custos VARIÁVEIS por km*			
Modelo	*Marca*	Reparo e Manutenção	Pneus, câmaras e recapagens	Combustível	Total dos custos variáveis por KM
17-280 E Constellation	VW	0,2990	0,0854	0,8252	**1,2095**
CARGO 2423 E 6x4 Turbo	FORD	0,3243	0,0710	0,9540	**1,3493**
Axor 2041 S	MBB	0,3236	0,1395	0,7690	**1,2321**
Axor 4141 K 6x4	MBB	0,3800	0,1095	1,0409	**1,5304**
FH-500 6X4	VOLVO	0,3866	0,1204	0,9767	**1,4837**
STRALIS 490-S40T TB Eurot.	IVECO	0,3333	0,0837	0,9229	**1,3398**
R 480 4x2 3-Eixos/6x2	SCANIA	0,3366	0,1095	0,9161	**1,3622**
G-400 A 4x2	SCANIA	0,3199	0,0602	0,8582	**1,2384**
G-440 A 6x4	SCANIA	0,3765	0,1095	1,0775	**1,5636**
HOWO 380 6X4 Basculante	SINOTRUK	0,2802	0,1743	0,9767	**1,4312**
24-280 E Constellation 6x2	VW	0,3763	0,1484	0,9943	**1,5190**
MÉDIA		**0,3397**	**0,1101**	**0,9374**	**1,3872**
Participação Média (%)		**24,49%**	**7,94%**	**67,58%**	

Fonte: Adaptado de GUIADOTRC (2015).

Observa-se que os custos com reparo e manutenção possuem valor máximo de R$0,3866/km e valor mínimo de R$0,2802/km, com uma média de R$0,3397/km, o que representa, em média, 24,49% do custo total varíavel de uma rota. Os custos com pneus, câmaras e recapagens, variam entre R$0,0602 e R$0,1743 por quilômetro percorrido, com um valor médio de R$0,1101/km (7,94%). O maior custo variável, o combustível, representa em média 67,58% do total (R$0,9374/km) sendo que o valor mínimo encontrado foi de 0,7690 reais por quilômetro e o valor máximo foi de 1,0775 reais por quilômetro.

Buscando representar melhor a grande gama de veículos pesados de transporte de carga que transitam nas rodovias do Brasil, foi escolhido o caminhão que mais se aproximava dos valores médio encontrados acima. Sendo assim, selecionou-se o Scania R 480, que possui uma variação, quando comparado à média, de apenas R$ 0,0031 (0,91%) nos custos relacionados a manutenção, R$ 0,0006 (0,56%) nos custos relacionado a pneus, e R$ 0,0213 (2,27%) nos custos com combustível. Na Figura 17 encontra-se uma imagem do veículo.

Figura 17: Caminhão Scania modelo R480.

Fonte: ONLYTRUECARS (2015).

Segundo Scania (2015), o veículo possui preço bruto total de 23 toneladas com um motor diesel de 480 cv. Na Figura 18 encontram-se mais algumas informações do caminhão.

Figura 18: Detalhes técnicos do R480.

Cilindrada (litros)	12.7
Potência Máxima	480 hp (353) kW a 1900 rpm
Torque Máximo	2400 Nm entre 1000 a 1350 rpm
Capacidade de Óleo	36 dm³
Freio Motor	261 kW a 2400 rpm

Fonte: SCANIA (2015).

O tanque de combustível do veículo possui capacidade original de 440 litros, podendo-se optar por acrescentar um outro tanque paralelo de 330 litros. Com o objetivo de se obter um maior número de paradas de abastecimento, foi considerado que o veículo só possui o tanque original. Como limite de segurança de combustível

foi utilizado um percentual de 5% em cima da capacidade máxima de 440 litros, o que gera um valor de 22 litros.

Diferentemente dos veículos automotivos de passeio, as montadoras dificilmente disponibilizam nas fichas técnicas dos veículos informações relativas ao consumo de combustível. Sendo assim, foi utilizada uma pesquisa realizada pelo IEMA (2013) que apresenta o consumo específico de combustível médio (l/100km e km/l) para uma série de tipos de caminhões e ônibus. Como estamos tratando de um veículo pesado, o consumo considerado será de 3,4 km/l, ou 0,2941 l/km.

Tabela 13: Consumo específico de combustível para veículo de grande porte.

Categoria	Consumo específico de combustível (L/100km)	km/L
Caminhoes semileves (PBT > 3,5 t. < 6 t.)	11,0	9,1
Caminhões leves (PBT. 6t. < 10 t.)	18,0	5,6
Caminhões médios (PBT. 10 t. < 15 t.)	18,0	5,6
Caminhões semipesados (PBT. 15 t.; PBTC < 40 t.)	29,0	3,4
Caminhões pesados (PBT. 15 t.; PBTC. 40 t.)	29,0	3,4
Onibus urbanos	43,5	2,3
Onibus rodoviarios	33,0	3,0

Fonte: Adaptado de IEMA (2013).

4.3 RESULTADOS DA MODELAGEM

O modelo proposto foi resolvido para 6 cenários diferentes, sendo que para cada uma das 3 rotas foi avaliado um cenário sem incluir o impacto da pavimentação e um cenário incluindo esse impacto nos custos operacionais e consumo de combustível. Para todos os cenários, utilizou-se o modelo proposto para verificar qual o menor custo possível do cenário analisado. Em busca da obtenção de qual seria o ganho potencial máximo do modelo proposto, o mesmo também foi utilizado invertendo a função objetivo para um problema de maximização. Com isso foi possível investigar

quais seriam os valores mínimos e máximos de custos que um veículo teria para cada cenário.

Para a Rota 1, sem inclusão do impacto da pavimentação, obteve-se um custo total de R$2.357,36 para percorrer os 2.011 quilômetros do percurso, o que gera um custo operacional variável de R$ 1,17 por quilômetro. O veículo realizou 4 paradas, abastecendo entre 56 e 213 litros e o volume de combustível no tanque manteve-se entre 51 e 235 litros. Se considerarmos o custo total possível da rota (R$2.589,95), conclui-se que a utilização de uma ferramenta de otimização de combustível pode reduzir em até 10% o custo operacional de um veículo transportador rodoviário de carga. Na Tabela 14, encontram-se os resultados do cenário.

Tabela 14: Resultados do Cenário 1 (Rota 1 – sem impacto da pavimentação).

Custo Total =	R$ 2.357,36		
Nó	**Quantidade Abastecida (l)**	**Custo reduzido (R$)**	**Combustível no Tanque (l)**
1	-	-	220,00
2	0,00	0,29	204,38
3	0,00	0,37	168,30
4	0,00	0,12	154,79
5	0,00	0,04	132,04
6	56,50	0,00	145,43
7	0,00	0,02	110,23
8	0,00	0,09	71,11
9	124,62	0,00	146,62
10	0,00	0,28	91,78
11	212,41	0,00	234,41
12	0,00	0,20	212,65
13	0,00	0,23	149,86
14	0,00	0,08	91,48
15	0,00	0,07	51,59
16	198,00	0,00	220,00
TOTAL	**591,53**		

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Ainda na Rota 1 porém agora com a inclusão dos dados relativos a qualidade da pavimentação, o custo total foi de R$2.526,68 para percorrer os mesmos 2.011 quilômetros, o que gera um custo operacional variável de R$ 1,26 por quilômetro. O

veículo realizou paradas nos mesmos postos de abastecimento do primeiro cenário, porém abastecendo entre 63 e 230 litros e com um volume de combustível no tanque variando entre 53 e 252 litros. Se considerarmos o custo total máximo possível da rota (R$2.765,85), a ferramenta apresenta ganhos de até 9,5%. Na Tabela 15 encontra-se os resultados do cenário.

Tabela 15: Resultados do Cenário 2 (Rota 1 – com impacto da pavimentação).

Custo Total =	R$ 2.526,68		
Nó	**Quantidade Abastecida (l)**	**Custo reduzido (R$)**	**Combustível no Tanque (l)**
1	-	-	220,00
2	0,00	0,29	202,35
3	0,00	0,37	163,74
4	0,00	0,12	149,28
5	0,00	0,04	126,31
6	63,90	0,00	146,67
7	0,00	0,02	111,11
8	0,00	0,09	71,61
9	125,86	0,00	147,86
10	0,00	0,28	92,47
11	229,68	0,00	251,68
12	0,00	0,20	228,39
13	0,00	0,23	161,20
14	0,00	0,08	98,74
15	0,00	0,07	53,66
16	198,00	0,00	220,00
TOTAL	**617,44**		

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Analisando os resultados dos dois primeiros cenários, observa-se que o impacto da qualidade da pavimentação no custo operacional variável total do veículo na rota foi de 7,2%. Essa variação se deu apesar de mais de metade (53,1%) do trajeto ser percorrido em rodovias com pavimentos classificados como excelentes. Em ambos os cenários o nível do tanque de combustível se manteve baixo em função da maior atratividade do preço do combustível na cidade de São Paulo e nos municípios da região Sul do país.

Para a Rota 2, no cenário sem inclusão da pavimentação, obteve-se um custo total de R$2.489,60 para percorrer os 2.088 quilômetros do percurso. Isso equivale a um custo operacional variável de R$ 1,19 por quilômetro. O veículo realizou 5 paradas, abastecendo entre 41 e 418 litros e o volume de combustível no tanque teve um grande amplitude, variando entre 53 e 440 litros. O custo total possível da rota foi de R$2.731,11, o que demonstra um ganho potencial da ferramenta de até 9,7% nos custos operacionais.

Tabela 16: Resultados do Cenário 3 (Rota 2 – sem impacto da pavimentação).

Custo Total =	R$ 2.489,60		
Nó	**Quantidade Abastecida (l)**	**Custo reduzido (R$)**	**Combustível no Tanque (l)**
1	-	-	220,00
2	0,00	0,22	157,12
3	61,36	0,00	161,20
4	0,00	0,22	119,52
5	0,00	0,12	53,94
6	418,00	0,00	440,00
7	48,53	0,00	440,00
8	41,76	0,00	440,00
9	44,50	0,00	426,27
10	0,00	0,19	397,86
11	0,00	0,17	343,15
12	0,00	0,19	283,36
13	0,00	0,12	220,00
TOTAL	**614,15**		

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Para o cenário com a inclusão dos dados relativos a qualidade da pavimentação na Rota 2, o custo total foi de R$2.857,91 para percorrer os mesmos 2.088 quilômetros, o que gera um custo operacional variável de R$ 1,37 por quilômetro. Diferentemente do cenário acima, o veículo realizou 6 paradas de abastecimento, uma a mais do que anteriormente, abastecendo entre 8 e 418 litros e com um volume de combustível no tanque variando entre 56 e 440 litros. Se considerarmos o custo total possível da rota (R$3.106,94), a ferramenta apresenta ganhos de até 8,7%. Na Tabela 17 encontra-se os resultados do cenário.

Tabela 17: Resultados do Cenário 4 (Rota 2 – com impacto da pavimentação).

Custo Total =	R$ 2.857,91		
Nó	**Quantidade Abastecida (l)**	**Custo reduzido (R$)**	**Combustível no Tanque (l)**
1	-	-	220,00
2	0,00	0,22	152,71
3	79,52	0,00	170,94
4	0,00	0,22	126,35
5	0,00	0,12	56,18
6	418,00	0,00	440,00
7	51,92	0,00	440,00
8	44,69	0,00	440,00
9	62,31	0,00	440,00
10	0,00	0,07	409,60
11	0,00	0,05	351,07
12	0,00	0,07	283,51
13	8,09	0,00	220,00
TOTAL	**664,53**		

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Assim como encontrado na rota 1, a rota 2 apresentou discrepância significante entre os resultados dos dois cenários. O impacto da pavimentação gerou um aumento de R$368,61 no custo total da rota, o que representa um acréscimo de 14,8%. Isso se deu grande parte em função de nenhum trecho da rota selecionada ser realizado em pavimentos ótimos (20% em pavimentos regulares e 80% em pavimentos bons). Em função da alta atratividade dos preços do diesel no estado de Minas Gerais, aproximadamente 87% do abastecimento foi feito no estado, o que gerou uma alta média de volume no tanque.

Finalmente, para a terceira e última rota (Rota 3), no cenário sem inclusão do impacto da pavimentação, obteve-se um custo total de R$2.508,53 para percorrer os 2.177 quilômetros do percurso, o que gera um custo operacional variável de R$ 1,15 por quilômetro. O veículo realizou 4 paradas, abastecendo entre 48 e 281 litros e o volume de combustível no tanque manteve-se entre 58 e 303 litros. Se considerarmos o custo total possível da rota (R$2.745,95), conclui-se que a utilização de uma ferramenta de otimização de combustível pode reduzir em até 9,5% o custo operacional de um veículo.

Tabela 18: Resultados do Cenário 5 (Rota 3 – sem impacto da pavimentação).

Custo Total =	R$ 2.508,53		
Nó	**Quantidade Abastecida (l)**	**Custo reduzido (R$)**	**Combustível no Tanque (l)**
1	-	-	220,00
2	0,00	0,04	155,47
3	70,34	0,00	184,05
4	0,00	0,09	137,88
5	0,00	0,02	74,64
6	280,75	0,00	302,75
7	0,00	0,12	255,11
8	0,00	0,12	206,11
9	0,00	0,14	147,29
10	0,00	0,14	105,23
11	0,00	0,14	58,17
12	48,53	0,00	70,53
13	240,64	0,00	262,64
14	0,00	0,00	220,00
TOTAL	**640,26**		

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Ainda na Rota 3 mas incluindo os impactos relativos à qualidade da pavimentação, o custo total foi de R$2.783,77 com um custo operacional variável de R$ 1,28 por quilômetro. O veículo realizou paradas nos mesmos postos de abastecimento do cenário anterior, porém com uma ligeira ampliação na amplitude de abastecimento, entre 49 e 300 litros e com um volume de combustível no tanque variando entre 58 e 322 litros. Se considerarmos o custo total possível da rota (R$3.024,93), a ferramenta apresenta ganhos de até 8,7%. Na Tabela 19 encontra-se os resultados do cenário.

Tabela 19: Resultados do Cenário 6 (Rota 3 – com impacto da pavimentação).

Custo Total =	R$ 2.783,77		
Nó	**Quantidade Abastecida (l)**	**Custo reduzido (R$)**	**Combustível no Tanque (l)**
1	-	-	220,00
2	0,00	0,04	150,96
3	89,12	0,00	195,39
4	0,00	0,09	145,99
5	0,00	0,02	78,33
6	299,36	0,00	321,36
7	0,00	0,12	270,38
8	0,00	0,12	215,01
9	0,00	0,14	148,54
10	0,00	0,14	106,06
11	0,00	0,14	58,54
12	49,01	0,00	71,01
13	241,07	0,00	263,07
14	0,00	0,00	220,00
TOTAL	**678,56**		

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Os resultados encontrados na rota de número 3 ficaram em um meio-termo quando comparado aos resultados das rotas 1 e 2. O impacto da pavimentação estabeleceu um aumento de 11% quando comparado ao cenário base. Isso foi devido a maior variedade de qualidade do pavimento entre os trechos, sendo 17% em pavimentos regulares, 49% em pavimentos bons e 34% em pavimentos ótimos. A maior parte do abastecimento, cerca de 80% para o cenário 6, foi realizada em apenas dois postos de abastecimento (Teixeira de Freitas e Pedras). Na Tabela 20, encontra-se o resultado de todos os seis cenários propostos.

Tabela 20: Resumo dos resultados dos seis cenários.

Resultados		Rota 1	Rota 2	Rota 3
Destino		Porto Alegre	Cuiabá	Fortaleza
Distância (km)		2011,33	2088,2	2177
Sem Impacto da Pavimentação	Custo Mínimo	R$ 2.357,36	R$ 2.489,60	R$ 2.508,53
	Custo Máximo	R$ 2.589,95	R$ 2.731,11	R$ 2.745,95
	Variação	R$ 232,59	R$ 241,51	R$ 237,42
	Variação (%)	9,87%	9,70%	9,46%
	Custo / km	R$ 1,17	R$ 1,19	R$ 1,15
Com Impacto da Pavimentação	Custo Mínimo	R$ 2.526,68	R$ 2.857,91	R$ 2.783,77
	Custo Máximo	R$ 2.765,85	R$ 3.106,94	R$ 3.024,93
	Variação	R$ 239,17	R$ 249,03	R$ 241,16
	Variação (%)	9,47%	8,71%	8,66%
	Custo / km	R$ 1,26	R$ 1,37	R$ 1,28
Variação Entre Cenários	Custo Mínimo	R$ 169,32	R$ 368,31	R$ 275,23
	Custo Mínimo (%)	7,18%	14,79%	10,97%
	Custo Máximo	R$ 175,90	R$ 375,82	R$ 278,98
	Custo Máximo (%)	6,79%	13,76%	10,16%
	Custo / km	R$ 0,08	R$ 0,18	R$ 0,13
	Custo / km (%)	7,18%	14,79%	10,97%

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Analisando a Tabela 20 podemos observar que, nos cenários sem o impacto da qualidade da pavimentação, os resultados para as rotas 1, 2 e 3 são bastantes semelhantes. Isso significa que, apesar dos custos do combustível variarem bastante dentre as regiões brasileiras, conforme mostrado na introdução, os custos mínimos e máximos nas rotas selecionados foram parecidos, com um custo mínimo por quilômetro de R$1,15 na rota 3 e um custo máximo de R$1,19 na rota 2, variação de apenas 3,5%.

Quando analisamos os cenários com a inclusão do impacto da pavimentação nos custos operacionais dos veículos, a situação é diferente. O custo mínimo por quilômetro encontrado foi na rota 1, R$1,26, e o máximo continuou na rota 2, R$1,37, variação essa de 8,7%. Pode-se concluir que, apesar da rota 1 não possuir os custos com combustíveis mais interessantes, esses estão na rota 3, a boa qualidade do pavimento das suas vias consegue fazer a rota ser a mais competitiva em termo de custos.

5 CONCLUSÕES

Dentro das empresas transportadoras de cargas rodoviárias, o combustível é responsável por 35% do total de seus custos. Porém, observou-se que os combustíveis possuem uma grande variabilidade de preços entre os diferentes postos de abastecimento, mesmo dentro de uma própria cidade, estado ou região do país.

Além dos custos com compra de combustível, outra condição que impacta nos custos de transporte do modal rodoviário é o estado de conservação das rodovias. A qualidade da pavimentação de um determinado trecho influencia diretamente nos custos operacionais dos caminhões, além de influenciar na quantidade de acidentes, tempos de viagem e emissão de poluentes.

Diante desse panorama, constatou-se que uma ferramenta que pudesse minimizar os custos operacionais de um veículo e avaliar o impacto das condições do pavimento em uma determinada rota seria de grande valia para as empresas transportadoras de carga, caminhoneiros, ou até mesmo o público geral que translada pelas estradas brasileiras.

Sendo assim foi desenvolvido um modelo matemático baseado em modelos de otimização da política de reabastecimento existentes e em ferramentas capazes de estimar o impacto da qualidade da via nos custos operacionais. Esse modelo foi implementado com auxílio de uma ferramenta de pesquisa operacional, OPL CPLEX, e utilizado para três rotas selecionadas com aproximadamente o mesmo comprimento. Para cada rota foi comparado os custos mínimos com e sem a inclusão das variáveis relativas à qualidade dos trechos percorridos. Todos os cenários foram simulados em questão de segundos, sendo assim factível a sua aplicação no cotidiano dos transportadores.

Analisando os resultados dos cenários é possível concluir que para o tamanho de rota selecionado, aproximadamente 2.000 quilômetros, o ganho potencial apresentado pelo modelo foi uma redução entre 8% e 10% do custo operacional total da rota. Além disso, a ferramenta demonstrou que dentro do cenário atual da

malha rodoviária brasileira, a qualidade da pavimentação das rodovias pode gerar impactos de até 14,8% nos custos com combustíveis, pneus e manutenções.

Com isso, o modelo proposto mostrou atender as expectativas tanto de redução nos custos operacionais dos veículos através de uma boa política de reabastecimento de combustível quanto de avaliar o impacto da qualidade da pavimentação nesses custos.

Como sugestões para trabalhos futuros, a ampliação do escopo da qualidade das rodovias incluindo a dimensão do impacto da geometria da via e a aplicação desses conceitos para uma modelagem considerando rotas variáveis. Além disso, pode-se incluir uma análise relativa a privatização das rovovias, a questão da alteração do valor do combustível ao longo da rota e a elaboração de um aplicativo computacional que realize esta operação no momento do abastecimento.

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). **Sistema de Levantamento de Preços.** Disponível em: <http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Mensal_Estado.asp>. Acesso em 22 jun. 2014.

AGÊNCIA CNT DE NOTÍCIAS. **Aumento do diesel terá impacto no custo do frete, alerta presidente da CNT**. Disponível em: < http://www.cnt.org.br/paginas/agencia_noticia.aspx?noticia=aumento-diesel-custo-do-frete-clesio-andrade-06032013>. Acesso em 14 mai. 2015.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BARNES, G.; LANGWORTHY, P. **The per-mile costs of operating automobiles and trucks.** National Technical Information Services, Springfield, Virginia, 2003.

BEIN, P. **Evaluation of state-of-the-art VOC models**. Road & Transport Research, Vol.2, No.3, pp. 28-39. Canadá, 1993.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. **Gestão logística de cadeias de suprimentos.** Porto Alegre: Bookman, 2006.

CADE. **Cade aplica R$ 120 milhões em multas por cartéis de combustíveis.** Disponível em: <http://www.cade.gov.br/Default.aspx?63d627f20217ed35c18ede74c080>. Acesso em 04 ago. 2015.

CALEIRO, J. P. **Valor de multas contra cartéis triplicou no Brasil em 2013**. Disponível em: <http://exame.abril.com.br/economia/noticias/valor-de-multas-contra-carteis-no-brasil-triplicou-em-2013?page=2>. Acesso em 22 jun. 2014.

CHATTI, K.; ZAABAR, I. **Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operating Costs.** Transportation research board. Washington: 2012.

COBA. **The Application Of The Coba Manual.** Economic Assessment Of Road Schemes, Vol.13, Section 1, Part 0. EUA, 2002.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de rodovias 2014**: relatório gerencial. Brasília: 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2014**: Ano base 2013. Rio de Janeiro: 2014.

FIND FUEL STOPS. **Find The Cheapest Truck Stop - TruckMaster Fuel Finder.** Disponível em: < http://www.findfuelstops.com/>. Acesso em 01 jul. 2015.

GAS BUDDY. **Daily fuel price index.** Disponível em: < http://media.gasbuddy.com/Methodology>. Acesso em 01 jul. 2015.

GOOGLE MAPS. Disponível em: <http://mapas.google.com>. Acesso em 4 jun. 2015.

GUIA DO TRANSPORTADOR (GUIADOTRC). **Planilhas de custos operacionais.** Disponível em: < www.guiadotrc.com.br/truckinfo/caminhoes_pesados.xls>. Acesso em 05 jul. 2015. **Expert Fuel® Savings: Carriers Find Relief for High Fuel Costs with IDSC's Fuel Optimization.**

IDSC. **Expert Fuel® Savings: Carriers Find Relief for High Fuel Costs with IDSC's Fuel Optimization**. Disponível em: <http://www.idscnet.com/news/Expert_Fuel_Diesel_Savings.htm>. Acesso em 01 jul. 2015.

IEMA. **Utilização de óleo diesel e emissões de CO2 por veículos rodoviários pesados.** Brasília, 2013.

INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES (IBM). **IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.** Disponível em: <http://www-03.ibm.com/software/products/pt/ibmilogcpleoptistud>. Acesso em 22 jun. 2014.

INSTITUTO DE LOGÍSTICA E SUPPLY CHAIN (ILOS). **Custos logísticos no Brasil.** Apresentação. Brasil, 2014.

IVECO. **Aplicativo da Iveco disponível para Android**. Disponível em: < http://www.blogiveco.com.br/2013/06/28/aplicativo-da-iveco-agora-tambem-disponivel-para-android/>. Acesso em 01 jul. 2015.

KHULLER, S.; MALEKIAN, A.; MESTRE, J. **To Fill or Not to Fill: The Gas Station Problem.** ACM Transactions on Algorithms, Vol. 7, No. 3, Article 36. Austrália, 2008.

LEWIS, D. L. **Road User and Mitigation Costs in Highway Pavement Projects.** Washington, D.C., EUA: National Academy Press, 1999.

LIN, S. H. **Finding Optimal Refueling Policies in Transportation** Networks. Algorithmic Aspects in Information and Management, pp. 280-291. China, 2008.

LIN, S. H.; GERTSCH, N.; RUSSELL, J. R. **A linear-time algorithm for finding optimal vehicle refueling policies.** Operations Research Letters, Vol. 35, pp. 290–296. EUA, 2007.

MANH. **Drive Your Network to Success**. Disponível em: < http://www.manhattanassociates.com/sites/default/files/sys/en/document/manh-carrier-management-brochure-product-information-en.pdf>. Acesso em 01 jul. 2015.

MARCHIORI, H. L. **Elaboração de um plano de negócio para o desenvolvimento de software para definição de rotas de transporte baseado no custo do combustível.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Produção do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2014.

MINNESOTA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (MDT). **Introduction to the International Roughness Index.** Bituminous Smoothness Training Workshop. EUA, 2007.

ODOKI, J. B. **A Tool for Investigating Road Investment Choices**. Inglaterra, 2015.

ONLYTRUECARS. World Encyclopedia of Cars. T**he best old cars, news and reviews about old cars. Stay in touch!** Disponível em: < http://onlytruecars.com/photo/im/scania-r480/01/default.htm >. Acesso em 07 jul. 2015.

PREÇO DOS COMBUSTÍVEIS. **Sobre o Preço dos Combustíveis.** Disponível em: < http://www.precodoscombustiveis.com.br/sobre>. Acesso em 01 jul. 2015.

PROMILES. **ProMiles Fuel Management.** Disponível em: < https://www.promiles.com/FuelManagement.asp>. Acesso em 01 jul. 2015.

RAGSDALE, C.T.. **Spreadsheet Modeling and Decision Analysis - A Practical Introduction to Management Science.** 5 ed. Virginia: South Western College, 2007.

REIS, N. G. **Impacto do estado das rodovias sobre o custo operacional dos caminhões**. Associação Nacional dos Transportes de Cargas. Brasília: 2006.

RESENDE, P.; SOUZA, P. R.; MONTEIRO, P. R. R. M.; DIAS, B. C.; SILVA; B. R. O.; SCOTT, F. A.; SOUZA, M. P. G. **Pesquisa Custos Logísticos no Brasil.** Relatório de Pesquisa. Fundação Dom Cabral, 2012.

RODRIGUES, A. D. **Um modelo de otimização da política de reabastecimento para transportadores rodoviários de carga.** Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2011.

RODRIGUES, A. D.; CRUZ, M. M. C. **A generic decision model of refueling policies: a case study of a Brazilian motor carrier**. Journal of Transport Literature, Vol. 7, n. 4, pp. 8-22. Brasil, 2013.

SCANIA. **Especificação Técnica: R 480 LA4x2 c/3º eixo RP835**. Disponível em: <http://www.scania.com.br/>. Acesso em 08 jul. 2015.

SUZUKI, Y. **A decision support system of dynamic vehicle refueling**. Decision Support Systems, Vol. 46, pp. 522-531. EUA, 2008b.

_____. **A decision support system of vehicle routing and refueling for motor carriers with time-sensitive demands.** Decision Support Systems, Volume 54, pp. 758-767. EUA, 2012.

_____. **A Generic Model of Motor-Carrier Fuel Optimization**. Naval Research Logistics, Vol. 55, pp. 737-746. EUA, 2008a.

SUZUKI, Y.; DAI, J. **Reducing the Fuel Cost of Motor Carriers by Using Optimal Routing and Refueling Policies.** Transportation Journal, Volume 51, Number 2, pp. 145-163. EUA, 2012.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS (UFSCAR). **Características do curso de graduação em Engenharia Civil**. Disponível em: < http://www2.deciv.ufscar.br/graduacao/o-curso/caracteristicas>. Acesso em 22 jun. 2014.

VERGARA, S. C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**, 5ª Ed. São Paulo: Atlas, 2004.

WAZE. **Pegue a melhor rota, todos os dias, com ajuda em tempo real de outros motoristas.** Disponível em: <https://www.waze.com/pt-BR>. Acesso em 01 jul. 2015.

WORLD BANK. **Highway Design and Maintenance Standards Model.** Disponível em: <http://www.worldbank.org/transport/roads/rd_tools/hdm3.htm>. Acesso em 10 jul. 2015.

ZANIEWSKI, J. P. **Effect of Pavement Surface Type on Fuel Consumption**. Portland Cement Association. EUA, 1989.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Arquivo de Dados da Rota 1 sem Impacto da Pavimentação

```
/*********************************************
 * OPL 12.5 Data
 * Author: Henrique Lugon Ferreira Silva
 *********************************************/

 N   =  16   ;

 DIS     =   [  53.10   122.70  45.94   77.33   146.59  119.70  133.00  167.00  186.47  237.25  74.00   213.50  198.50  135.65  100.60   ]   ;

 IPC     =   [  1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00     ]   ;
 IPP     =   [  1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00     ]   ;
 IPM     =   [  1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00     ]   ;

 C   =   [  2.87    2.95    2.70    2.62    2.58    2.60    2.67    2.52    2.80    2.50    2.70    2.73    2.58    2.57    2.37     ]   ;

 QMAX    =  440  ;
 QIEF    =  220  ;
 QSEG    =  22   ;

 CCO     =  0.2941   ;
 CPN     =  0.1095   ;
 CRM     =  0.3366   ;
```

APÊNDICE B – Arquivo de Dados da Rota 1 com Impacto da Pavimentação

```
/*********************************************
 * OPL 12.5 Data
 * Author: Henrique Lugon Ferreira Silva
 *********************************************/

 N   =  16   ;

 DIS     =   [  53.10   122.70  45.94   77.33   146.59  119.70  133.00  167.00  186.47  237.25  74.00   213.50  198.50  135.65  100.60   ]   ;

 IPC     =   [  1.13    1.07    1.07    1.01    1.01    1.01    1.01    1.01    1.01    1.01    1.07    1.07    1.07    1.13    1.07     ]   ;
 IPP     =   [  1.03    1.02    1.02    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.02    1.02    1.02    1.03    1.02     ]   ;
 IPM     =   [  1.80    1.20    1.20    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.20    1.20    1.20    1.80    1.20     ]   ;

 C   =   [  2.87    2.95    2.70    2.62    2.58    2.60    2.67    2.52    2.80    2.50    2.70    2.73    2.58    2.57    2.37     ]   ;

 QMAX    =  440  ;
 QIEF    =  220  ;
 QSEG    =  22   ;

 CCO     =  0.2941   ;
 CPN     =  0.1095   ;
 CRM     =  0.3366   ;
```

APÊNDICE C – Arquivo de Dados da Rota 2 sem Impacto da Pavimentação

```
/*********************************************
 * OPL 12.5 Data
 * Author: Henrique Lugon Ferreira Silva
 *********************************************/

 N   =  13   ;

 DIS     =   [  213.82  194.76  141.70  223.00  108.60  165.00  142.00  198.00  96.60   186.00  203.30  215.45   ]   ;

 IPC     =   [  1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00     ]   ;
 IPP     =   [  1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00     ]   ;
 IPM     =   [  1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00     ]   ;

 C   =   [  2.82    2.60    2.82    2.72    2.46    2.66    2.78    2.81    3.00    2.98    3.00    2.93     ]   ;

 QMAX    =  440  ;
 QIEF    =  220  ;
 QSEG    =  22   ;

 CCO     =  0.2941   ;
 CPN     =  0.1095   ;
 CRM     =  0.3366   ;
```

APÊNDICE D – Arquivo de Dados da Rota 2 com Impacto da Pavimentação

```
/*********************************************
 * OPL 12.5 Data
 * Author: Henrique Lugon Ferreira Silva
 *********************************************/

 N   =  13   ;

 DIS     =   [  213.82  194.76  141.70  223.00  108.60  165.00  142.00  198.00  96.60   186.00  203.30  215.45   ]   ;

 IPC     =   [  1.07    1.07    1.07    1.07    1.07    1.07    1.07    1.07    1.07    1.07    1.13    1.13     ]   ;
 IPP     =   [  1.02    1.02    1.02    1.02    1.02    1.02    1.02    1.02    1.02    1.02    1.03    1.03     ]   ;
 IPM     =   [  1.20    1.20    1.20    1.20    1.20    1.20    1.20    1.20    1.20    1.20    1.80    1.80     ]   ;

 C   =   [  2.82    2.60    2.82    2.72    2.46    2.66    2.78    2.81    3.00    2.98    3.00    2.93     ]   ;

 QMAX    =  440  ;
 QIEF    =  220  ;
 QSEG    =  22   ;

 CCO     =  0.2941   ;
 CPN     =  0.1095   ;
 CRM     =  0.3366   ;
```

APÊNDICE E – Arquivo de Dados da Rota 3 sem Impacto da Pavimentação

```
/*********************************************
 * OPL 12.5 Data
 * Author: Henrique Lugon Ferreira Silva
 *********************************************/

 N   =  14   ;

 DIS     =   [  219.40  142.00  157.00  215.00  179.00  162.00  166.62  200.00  143.00  160.00  123.00  165.00  145.00   ]   ;

 IPC     =   [  1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00     ]   ;
 IPP     =   [  1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00     ]   ;
 IPM     =   [  1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00     ]   ;

 C   =   [  2.78    2.74    2.83    2.76    2.53    2.65    2.65    2.67    2.67    2.67    2.41    2.15    2.15     ]   ;

 QMAX    =  440  ;
 QIEF    =  220  ;
 QSEG    =  22   ;

 CCO     =  0.2941   ;
 CPN     =  0.1095   ;
 CRM     =  0.3366   ;
```

APÊNDICE F – Arquivo de Dados da Rota 3 com Impacto da Pavimentação

```
/*********************************************
 * OPL 12.5 Data
 * Author: Henrique Lugon Ferreira Silva
 *********************************************/

 N   =  14   ;

 DIS     =   [  219.40  142.00  157.00  215.00  179.00  162.00  166.62  200.00  143.00  160.00  123.00  165.00  145.00   ]   ;

 IPC     =   [  1.07    1.07    1.07    1.07    1.07    1.07    1.13    1.13    1.01    1.01    1.01    1.01    1.01     ]   ;
 IPP     =   [  1.02    1.02    1.02    1.02    1.02    1.02    1.03    1.03    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00     ]   ;
 IPM     =   [  1.20    1.20    1.20    1.20    1.20    1.20    1.80    1.80    1.00    1.00    1.00    1.00    1.00     ]   ;

 C   =   [  2.78    2.74    2.83    2.76    2.53    2.65    2.65    2.67    2.67    2.67    2.41    2.15    2.15     ]   ;

 QMAX    =  440  ;
 QIEF    =  220  ;
 QSEG    =  22   ;

 CCO     =  0.2941   ;
 CPN     =  0.1095   ;
 CRM     =  0.3366   ;
```