

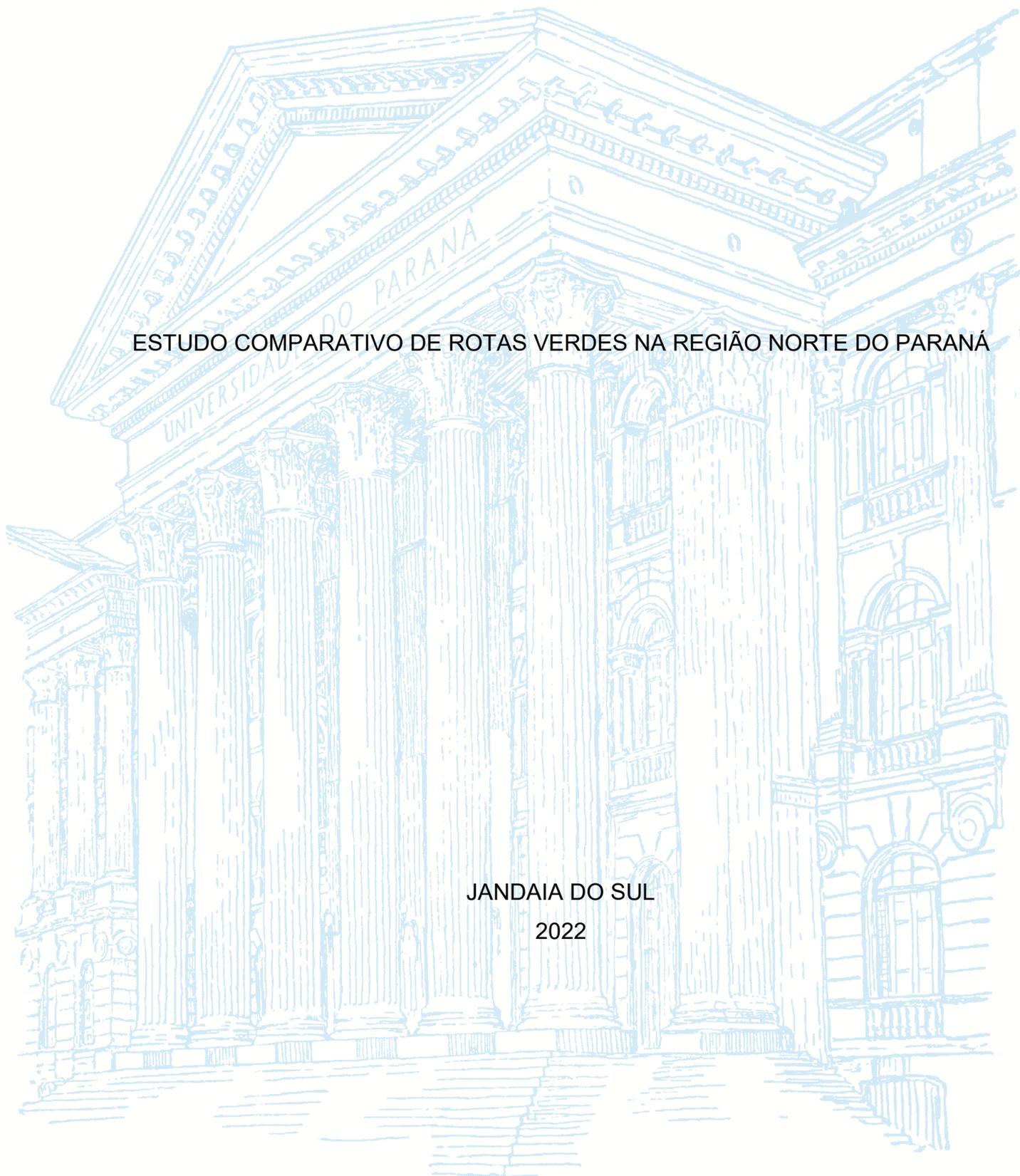
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNO RODRIGO DA SILVA

ESTUDO COMPARATIVO DE ROTAS VERDES NA REGIÃO NORTE DO PARANÁ

JANDAIA DO SUL

2022



BRUNO RODRIGO DA SILVA

ESTUDO COMPARATIVO DE ROTAS VERDES NA REGIÃO NORTE DO PARANÁ

TCC apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Produção, Campus de Jandaia do Sul, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurelio Reis dos Santos.

JANDAIA DO SUL

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA JANDAIA DO SUL

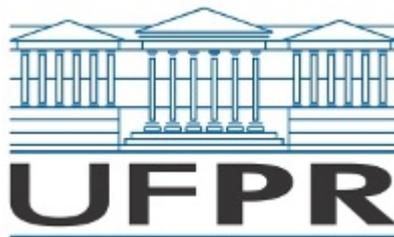
Silva, Bruno Rodrigo da  
Estudo comparativo de rotas verdes na região Norte do Paraná. /  
Bruno Rodrigo da Silva. – Jandaia do Sul, 2022.  
1 recurso on-line : PDF.

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Paraná,  
Campus Jandaia do Sul, Graduação em Engenharia de Produção.  
Orientador: Prof. Dr. Marco Aurelio Reis dos Santos.

1. Logística. 2. Dióxido de carbono. 3. Modal rodoviário.  
4. Modelo proposto. 5. Roteirizadores. I. Santos, Marco Aurelio  
Reis dos. II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDD 658.4

Bibliotecário: César A. Galvão F. Conde - CRB-9/1747



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
**PARECER Nº** 74-BRUNO RODRIGO DA SILVA/2022/UFPR/R/JA  
**PROCESSO Nº** 23075.079917/2019-87  
**INTERESSADO:** BRUNO RODRIGO DA SILVA

## TERMO DE APROVAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Título: ESTUDO COMPARATIVO DE ROTAS VERDES NA REGIÃO NORTE DO PARANÁ

Autor(a): BRUNO RODRIGO DA SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau no curso de Engenharia de Produção, aprovado pela seguinte banca examinadora no dia 14/09/2022, das 10h30 às 11h30.

Dr. Marco Aurélio Reis dos Santos (Orientador)

Dr. Landir Saviniec

Dr. Giancarlo Alfonso Lovón Canchumani



Documento assinado eletronicamente por **MARCO AURELIO REIS DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/09/2022, às 15:24, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **LANDIR SAVINIEC, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/09/2022, às 15:24, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **GIANCARLO ALFONSO LOVON CANCHUMANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/09/2022, às 15:25, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **4935491** e o código CRC **4EE55301**.

## RESUMO

A logística empresarial utiliza roteirizadores para resolver problemas complexos como, por exemplo, gerar rotas a fim de diminuir tempo ou distância no transporte de suas mercadorias, mas não levam em consideração que a queima de combustíveis fósseis geram gases poluentes como o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) que em grande quantidade pode ser prejudicial à saúde dos seres vivos e provocar aumento na temperatura do planeta. No Brasil, grande parte do transporte de cargas e passageiros é feita pelo modal rodoviário e com a falta de infraestrutura nas rodovias e o grande número de veículos nas estradas, resultam em um grande aumento nas emissões de  $CO_2$ . Desta forma, o objetivo principal desta pesquisa é comparar as rotas geradas por roteirizadores de distância e tempo mínimos, com o modelo implementado neste trabalho e assim descobrir quanto o modelo proposto pode reduzir as emissões de  $CO_2$  e quais fatores afetam esse resultado, para que ocorra essa diferença entres os modelos.

Palavras-chave: Logística. Dióxido de carbono. Modal rodoviário. Modelo proposto. Roteirizadores.

## ABSTRACT

Business logistics use routers to solve complex problems, such as generating routes in order to reduce time or distance in the transport of their goods, but they do not take into account that the burning of fossil fuels generates polluting gases such as carbon dioxide ( $CO_2$ ) which in large quantities can be harmful to the health of living beings and cause an increase in the temperature of the planet. In Brazil, much of the transport of cargo and passengers is done by road and with the lack of infrastructure on the highways and the large number of vehicles on the roads, result in a large increase in  $CO_2$  emissions. In this way, the main objective of this research is to compare the routes generated by routers of minimum distance and time, with the model implemented in this work and thus find out how much the proposed model can reduce  $CO_2$  emissions and which factors affect this result, for this difference between the models to occur.

Keywords: Logistics. Carbon dioxide. Road mode. Suggested model. Routers.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – GESTÃO AMBIENTAL EMPRESARIAL -- INFLUÊNCIAS. ....	24
FIGURA 2 -- RECURSOS NATURAIS -- TIPOS E EXEMPLOS.....	25
FIGURA 3 – EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO SETOR DE ENERGIA.....	26
FIGURA 4 – ESTRUTURA METODOLÓGICA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....	28
FIGURA 5 – RELACIONAMENTO ENTRE A LOGÍSTICA VERDE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....	32
FIGURA 6 – ETAPAS DA MODELAGEM .....	35
FIGURA 7 – REGIÃO NORTE DO PARANÁ .....	36
FIGURA 8 – RELEVO DA REGIÃO NORTE DO PARANÁ.....	37
FIGURA 9 – COEFICIENTES PARA A EQUAÇÃO DO Cr .....	39
FIGURA 10 – ESPECIFICAÇÕES DOS VEÍCULOS A) LEVE B) PESADO .....	43
FIGURA 11 – RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE CAMINHO MÍNIMO PARA MINIMIZAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL .....	45
FIGURA 12 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ NOVA ESPERANÇA; B) ROTA DO GOOGLE MAPS .....	48
FIGURA 13 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ SANTA FÉ; B) ROTA DO GOOGLE MAPS.....	51
FIGURA 14 – ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ ÂNGULO PARA A) VEÍCULO PESADO E B) VEÍCULO LEVE ; C) ROTA DO GOOGLE MAPS .....	53
FIGURA 15 – ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ A REGIÃO DE IRETAMA PARA A) VEÍCULO PESADO E B) VEÍCULO LEVE; C) ROTA DO GOOGLE MAPS .....	56
FIGURA 16 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL HÁ TUNEIRAS DO OESTE; B) ROTAS DO GOOGLE MAPS SENDO A LINHA CINZA COM UM TEMPO DE VIAGEM DE 2h E 32 min A ROTA ALTERNATIVA.....	59
FIGURA 17 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ MAMBORÊ; B) ROTA DO GOOGLE MAPS .....	61

FIGURA 18 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ FLORESTÓPOLIS; B) ROTA DO GOOGLE MAPS .....	63
FIGURA 19 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL HÁ CENTENÁRIO DO SUL; B) ROTA DO GOOGLE MAPS .....	65
FIGURA 20 – ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ REGIÃO DE URAÍ PARA A) VEÍCULO PESADO E B) VEÍCULO LEVE; C) ROTA DO GOOGLE MAPS .....	68
FIGURA 21 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ BELA VISTA DO PARAÍSO; B) ROTA DO GOOGLE MAPS .....	70
FIGURA 22 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ MANOEL RIBAS; B) ROTA DO GOOGLE MAPS .....	72
FIGURA 23 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ SÃO JORGE DO IVAÍ; B) ROTA DO GOOGLE MAPS .....	74

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE <i>C02</i> GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 1).....	49
GRÁFICO 2 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE <i>C02</i> GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 2).....	52
GRÁFICO 3 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE <i>C02</i> GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 3).....	55
GRÁFICO 4 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE <i>C02</i> GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 4).....	57
GRÁFICO 5 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE <i>C02</i> GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 1).....	60
GRÁFICO 6 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE <i>C02</i> GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 2).....	62
GRÁFICO 7 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE <i>C02</i> GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 3).....	64
GRÁFICO 8 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE <i>C02</i> GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 4).....	66
GRÁFICO 9 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE <i>C02</i> GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 1).....	69
GRÁFICO 10 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE <i>C02</i> GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 2).....	71

GRÁFICO 11 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE $CO_2$ GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 3).....	73
GRÁFICO 12 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE $CO_2$ GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 4).....	75

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – ESTRUTURA DE CUSTOS DE CADA MODAL .....	30
--	----

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CONVERSÃO DE GASES ESTUFA PARA $CO_2e$ .....	27
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS RELATIVAS POR MODAL DE TRANSPORTE* .....	30
TABELA 3 – COEFICIENTE RELATIVO AO TIPO DE SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO .....	40

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ACV - Avaliação do ciclo de vida de um produto

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

*Ar* - Argônio

BR - Brasil

$C_3H_8$  - Propano

$CH_4$  - Metano

$CO$  - Monóxido de carbono

$CO_2$  - Dióxido de Carbono

EUA - Estados Unidos

*He* - Hélio

$H_2O$  - vapor de água

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

IBPT - Instituto Brasileiro de Planejamento e Tributação

ILOS - Instituto de Logística e Supply Chain (Cadeia de Suprimentos)

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

ISO -International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)

*Kr* - Criptônio

$MtCO_2$  - Milhões de toneladas Métricas de Dióxido de Carbono

$N_2$  - Nitrogênio

$N_2O$  - Óxido nitroso

*Ne* - Neônio

$NOx$  - Óxidos de nitrogênio

$O_2$  - Oxigênio

$O_3$  - Ozônio

OC - Observatório do Clima

PO - Pesquisa Operacional

PR - Paraná

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa

$SO_2$  - Dióxido de enxofre

$SO_x$  - Óxidos de enxofre

$Xe$  - Xenônio

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$  - Alfa

$\beta$  - Beta

$\delta$  - Delta

$\eta$  - eta

$\varepsilon$  - Epsilon

$\Phi$  - Fi

$\in$  - ié (pertenence)

$\lambda$  - Lambda

$\omega$  - Ômega

$\rho$  - ró

$\Sigma$  - somatório de números

$\subset$  - Subconjunto

$\Theta$  - Teta

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	16
1.2 JUSTIFICATIVA .....	19
1.3 OBJETIVOS .....	21
1.3.1 Objetivos específicos.....	21
<b>2 O PROBLEMA DE CAMINHOS MÍNIMOS PARA FULL TRUCKLOAD</b> .....	<b>22</b>
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>24</b>
3.1 GESTÃO AMBIENTAL .....	24
3.2 LOGÍSTICA .....	28
3.2.1 Logística Verde .....	31
3.3 PESQUISA OPERACIONAL .....	32
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>34</b>
4.1 ENQUADRAMENTO DA PESQUISA.....	34
4.2 FERRAMENTAS DE COLETA DE DADOS .....	36
4.3 FERRAMENTAS DE ANÁLISE .....	38
4.4 ALGORITMO DE DIJKSTRA.....	45
<b>5 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS</b> .....	<b>47</b>
5.1 ROTAS PLANAS.....	47
5.1.1 Rota 1.....	47
5.1.2 Rota 2.....	50
5.1.3 Rota 3.....	53
5.1.4 Rota 4.....	56
5.2 ROTAS ELEVADAS .....	58
5.2.1 Rota 1.....	58
5.2.2 Rota 2.....	61
5.2.3 Rota 3.....	63
5.2.4 Rota 4.....	65
5.3 ROTAS MISTAS.....	67
5.3.1 Rota 1.....	67
5.3.2 Rota 2.....	70
5.3.3 Rota 3.....	72
5.3.4 Rota 4.....	74

5.4 ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL .....	76
5.5 EMISSÕES DE <i>CO2</i> .....	77
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>78</b>
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	78
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a contextualização dos problemas abordados neste trabalho, como também a justificativa e os objetivos a serem alcançados.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A Logística Verde tem por objetivo minimizar o impacto ambiental gerado pelos processos logísticos, que abrangem todo o transporte, distribuição e armazenagem dos produtos, ou seja, visa buscar equilíbrio ambiental e econômico para as empresas, como por exemplo, reduzindo o uso de recursos não renováveis (petróleo, gás natural, dentre outros), reaproveitando embalagens para criação de novos produtos, otimizando rotas a fim de minimizar a queima de combustíveis fósseis, entre outros (ALVARENGA e RODRIGUES, 2018). Desta forma, a Logística Verde trabalha para reduzir a poluição global gerada pelas empresas, ou seja, a geração de gases que de forma exagerada pode ocasionar em degradação do meio ambiente e alteração na composição dos gases que compõem a atmosfera (ALVARENGA e RODRIGUES, 2018; CARVALHO *et. al.*, 2011).

O IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, do inglês, *Intergovernmental Panel Climate Change*) criado com o objetivo de instituir uma base de dados sobre o aquecimento global define o termo mudança climática como alterações em longo prazo no clima do planeta, como por exemplo, modificações na temperatura do planeta, ondas de calor, furacões, dentre outros eventos que se estendem em um grande período de tempo devido principalmente as atividades humanas (CARVALHO *et. al.*, 2011; JACOBI *et. al.*, 2011).

A atmosfera é composta por uma mistura gasosa formada principalmente por 20,95% de oxigênio ( $O_2$ ) e 78,08% de nitrogênio ( $N_2$ ), sendo o restante dessa mistura de 0,97% formada pelo dióxido de carbono ( $CO_2$ ), e por alguns gases nobres (Argônio ( $Ar$ ), Neônio ( $Ne$ ), Hélio ( $He$ ), Criptônio ( $Kr$ ), Xenônio ( $Xe$ )), ozônio ( $O_3$ ), além de dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), propano ( $C_3H_8$ ), e vapor de água ( $H_2O$ ) (DIAS *et. al.*, 2007). Essa mistura é responsável por absorver 19% da radiação solar (ultravioleta), enquanto a superfície terrestre absorve 51% dessa radiação e irradia parte dessa porcentagem em forma de radiação

infravermelha de volta para o espaço, onde gases como o  $CO_2$ ,  $O_3$  e vapor de água absorvem parte dessa radiação infravermelha, aquecendo o planeta Terra e mantendo a média de temperatura de aproximadamente 15 °C, sendo esse fenômeno chamado de efeito estufa (DIAS *et. al.*, 2007; TOLENTINO e FILHO, 1998).

Os gases presentes na atmosfera podem variar sua composição devido a processos naturais (erupções vulcânicas, tempestades de areia, poeira cósmica, entre outros) e processos realizados pelas atividades humanas (queimadas, atividades industriais, queima de combustíveis fósseis, agricultura, dentre outras) (DIAS *et. al.*, 2007). Caso essa variação for crescente principalmente aos gases que absorvem a radiação da superfície do planeta, pode acarretar em aumento da temperatura média na Terra, além de elevação do nível dos mares (causada pelo degelo das calotas polares), alterações climáticas (acréscimo no número de tempestades, ondas de calor), aumento na incidência de doenças para os seres humanos (cardiovasculares e respiratórias) (SILVA *et. al.*, 2016; TOLENTINO e FILHO, 1998).

No que tange as atividades humanas, a que ocorre mais incidência na elevação da composição dos gases estufa, não somente eles, mas também gases que são formados através de processos de combustão (reação química exotérmica entre um combustível (madeira, metano, propano) e um comburente (oxigênio)), que com a falta de oxigênio nesse processo a reação se torna incompleta, formando assim gases ainda mais tóxicos a vida dos seres vivos como o Monóxido de carbono ( $CO$ ), óxidos de nitrogênio ( $NOx$ ), óxidos de enxofre ( $SOx$ ), dentre outros (GIODA, 2018). A formação desses gases poluentes ocorre principalmente das atividades humanas realizadas em países desenvolvidos, como a China e os Estados Unidos (EUA) que somam aproximadamente 38% das emissões globais de  $CO_2$  (BERCITO, 2017).

No Brasil, o cenário não é diferente, um exemplo disso é o crescente número de veículos automotores, que em 2021 registrou cerca de 111 milhões de automóveis circulando no país, sendo deste total aproximadamente 3 milhões são de veículos pesados (IBGE, 2021). Tal quantidade de veículos gera altos níveis de congestionamento nas cidades, isso devido à falta de melhorias na distribuição dos modais (rodoviário, hidroviário, ferroviário, aéreo e dutoviário) para o transporte de

cargas e passageiros no país, onde 93,7% desse transporte estão concentradas no modal rodoviário, que ainda possui baixa qualidade nas rodovias, pois a cada 1000 km<sup>2</sup> de estradas, apenas 25 km são pavimentados. Em 2016 foi registrado um total de 204 MtCO<sub>2</sub> (Milhões de toneladas métricas de dióxido de carbono) emitidas no setor de transporte do país (SEEG, 2018). Desta forma, não somente aumenta a geração de gases tóxicos, mas também aumenta o custo logístico, o qual em 2012 as empresas utilizaram 8,7% de suas receitas líquidas para cobrir esse custo, um aumento de 0,2% em comparação a 2010 (IBAMA, 2017; ILOS, 2019).

Com esses crescentes aumentos das emissões de gases poluentes, 195 países assinaram em 2015 o acordo de Paris, que tem por objetivo limitar o aumento de temperatura na terra em até 1,5°C (OC, 2015). Deste modo, todos os países que fazem parte do acordo possuem metas de redução da poluição a serem cumpridas. O Brasil tem por meta reduzir em 37% as emissões de gases poluentes até 2025 e 43% até 2030, tendo como referência as emissões registradas em 2005 (OC, 2015).

Um meio para que o Brasil cumpra suas metas seria a maior utilização de recursos renováveis, por exemplo, o uso de biocombustíveis, como o biodiesel e o bioetanol, que é fabricado através do uso de óleo vegetal (mamona, soja, girassol, entre outros) ou animal (sebo bovino, suíno, dentre outros), onde a redução de CO<sub>2</sub> na utilização do biodiesel em veículos automotores, em comparação com o diesel (combustível fabricado a partir do petróleo) que é um combustível fóssil e não renovável, pode chegar a 70% (CHAVES e GOMES, 2012; GAZZONI, 2007). Outro meio para redução de emissões de CO<sub>2</sub> em veículos automotores seria a utilização de automóveis elétricos, o mesmo não depende de combustão para se movimentar, tendo a principal fonte de emissão no carregamento da bateria do veículo, que se for utilizada uma energia elétrica gerada de fontes limpas a redução de CO<sub>2</sub> pode chegar em média a 30% em comparação com a gasolina. (MOTA, 2018).

Além dos biocombustíveis, o uso da Pesquisa Operacional (PO), que é responsável por utilizar modelos matemáticos para tomada de decisões em problemas complexos (ARENALES et al, 2015), pode ser usada para geração de rotas com objetivo de reduzir emissões de gases poluentes (CO<sub>2</sub>). Tais problemas que, dentre outros objetivos, visam reduzir os impactos ambientais são denominados de verdes. Em particular, o problema de Roteamento de Veículos que visa reduzir a emissão de gases do efeito estufa, como o CO<sub>2</sub>, é chamado de problema de

Roteirização Verde de Veículos (o termo tem origem do termo em inglês “*Green Vehicle Routing Problem*”) (ERDOGAN e HOOKS, 2012).

Desta forma não só o Brasil, mas todo o mundo pode reduzir as emissões de gases poluentes, melhorando assim a qualidade de vida dos seres vivos. O uso de rotas verdes pode trazer vantagens empresariais como a certificação ISO (*International Organization for Standardization* ou Organização Internacional para Padronização) 14064 a 14066 (normalização para diminuição de gases de efeito estufa) e em atender as exigências dos *stakeholders* (grupos interessados na produção de determinado produto ou serviço, como o governo, clientes, fornecedores, entre outros), já que os mesmos, em geral, exigem produção e serviços com menor impacto ambiental (BÁNKUTI e BÁNKUTI, 2014; SEIFFERT, 2011).

Com base nas informações apresentadas, surge a seguinte pergunta de pesquisa desse trabalho, que tem como meta desenvolver um modelo que visa à redução das emissões de  $CO_2$  a fim de compará-las com o georreferenciador Google Maps para descobrir quão poluidores são modelos que visam a redução de tempo ou distância. O modelo proposto se caracteriza por ser um Problema de Caminho Mínimo que tem por objetivo encontrar o menor caminho entre dois pontos. O método de solução para este problema será o algoritmo de Dijkstra que busca o menor caminho a partir de uma origem fixa (MÉNDEZ e GUARDIA, 2008). Esse trabalho também se caracteriza por desenvolver um modelo para cargas consolidadas, ou seja, transporte direto sem paradas (*Full TruckLoad*), por ser tratar de um modelo de Caminho Mínimo (GEBRAN, 2012).

Quão sustentáveis são as rotas geradas por roteirizadores de distância mínima ou de tempo mínimo?

## 1.2 JUSTIFICATIVA

As principais motivações em realizar esse trabalho esta na importância em reduzir os elevados índices de  $CO_2$  que são emitidos pela combustão de veículos automotores, e em descobrir se realmente as rotas que visam menor tempo ou distância são as mesmas que visam menor emissão de  $CO_2$ , além de mostrar a

importância da logística verde e da Pesquisa Operacional para resolver problemas como o deste trabalho, que com a resolução adequada pode melhorar a qualidade de vida dos seres vivos.

O exemplo a seguir explica melhor esta justificativa, utilizando as fórmulas encontradas em Demir *et. al.* (2011):

Um caminhoneiro está transportando um produto até um cliente em uma cidade vizinha com a empresa que ele trabalha, com o caminhão a diesel estando em seu peso máximo, de aproximadamente 16000 kg. Com auxílio de um roteirizador convencional, que tem como principal objetivo gerar rotas de menor distância gerou-se a rota com distância igual a 8 km para o seu trajeto, mas que no meio do caminho tem uma montanha com inclinação de 15 graus para a subida e menos 15 graus para a descida, mas ele pode escolher em ir a um caminho mais longo com distância de 10 km dando a volta na montanha, nessa rota alternativa não há inclinação na rodovia. Considerando uma velocidade de 50 km/h e os valores estimados das fórmulas encontradas em Demir *et. al.* (2011), segue os seguintes resultados:

- a) Os valores de relação massa-combustível-ar (1,02), eficiência do motor (40%), fator de atrito (0,2), deslocamento do motor (9,3 litros) são os mesmos para os três casos (subida, descida e plana);
- b) O valor de velocidade de rotação do motor é maior na subida (1900 revoluções por minuto (rpm)), porque exige mais eficiência do motor, sendo na descida um valor de 1050 rpm e na via plana 1100 rpm;
- c) A potência de saída é de 60 kilowatt na descida, 235 kilowatt na subida e 70 kilowatt na via plana.

Consequentemente, se o caminhoneiro for pela montanha ele vai emitir aproximadamente 145,49 kg de  $CO_2$  a mais que se ele optar pela rota sem inclinação.

Este exemplo mostra bem o interesse do autor em desenvolver um modelo de rotas verdes para gerar rotas que diminuam a emissão de  $CO_2$  na atmosfera, principalmente para os veículos pesados, que exigem muito mais do motor em rotas com grande elevação da via.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é comparar as rotas geradas por roteirizadores de distância e tempo mínimos, com o modelo implementado neste trabalho.

#### 1.3.1 Objetivos específicos

- a) Estudar uma forma de adaptar a malha de georreferenciadores convencionais (Google Maps) para o uso do modelo;
- b) Estimar a taxa de emissão de dióxido de carbono pela passagem do veículo em cada via, através da literatura;
- c) Gerar rotas através do algoritmo de Dijkstra;
- d) Comparar os resultados do modelo com o Google Maps quanto à redução de emissão de  $CO_2$  e consumo de combustível.

## 2 O PROBLEMA DE CAMINHOS MÍNIMOS PARA FULL TRUCKLOAD

Esse trabalho caracteriza-se por desenvolver um modelo de Caminho Mínimo para cargas consolidadas, ou seja, transporte direto sem paradas (*Full TruckLoad*). Esse tipo de transporte minimiza o tempo de trajeto, além da redução de perdas no transporte de mercadorias, por não haver manuseio no trajeto, tendo como desvantagem ser entrega única, não podendo, por exemplo, fazer entregas para vários clientes (GEBRAN, 2012):

O Problema de Caminho Mínimo tem por objetivo encontrar o menor caminho entre dois vértices (nós) de um grafo (formas geométricas de representar relações entre objetos de um vértice ao outro, por exemplo, as ruas de uma cidade) seja para minimizar custos, tempo ou distância (MÉNDEZ e GUARDIA, 2008). Esse problema é um dos mais famosos da Pesquisa Operacional, por ser aplicável em diversos outros problemas operacionais como o de roteamento de veículos, caixeiro viajante, de fluxo de custos, dentre outros que usam dos mesmos critérios que os de caminhos mínimos para resolução de tais problemas (SOUZA, 2015).

Seja um grafo orientado  $G = (N, A)$ , onde  $N$  é um conjunto de vértices (nós) com  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  e  $A$  é um conjunto de arestas (arcos) com  $A = \{1, 2, \dots, m\}$ , sendo as arestas compostas por pares ordenados de vértices  $(i, j)$ , onde cada uma delas contém um valor  $c_{ij}$  que pode representar custos, tempos, distâncias entre outros, dependendo da situação do problema. Desta forma, a modelagem do problema é dada a seguir segundo Wilhelm (2022, p. 84-85), sendo  $S(j)$  um conjunto dos nós sucessores de  $j$  e  $P(j)$  um conjunto dos nós predecessores de  $j$ :

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j \in S(i)} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Restrições:

$$\sum_{j \in S(i)} x_{1j} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i \in P(n)} x_{in} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in P(j)} x_{ij} = \sum_{k \in S(j)} x_{jk}, j = 2, \dots, n - 1 \quad (4)$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ para todo } (i, j) \in A \quad (5)$$

A expressão (1) representa a função objetivo, que deseja minimizar a soma de todos os valores de  $c_{ij}$ , como, por exemplo, a soma de todas as distâncias percorrida pelo menor caminho que partiu de  $s = 1$  (vértice de origem) até  $t = n$  (vértice de destino).

As expressões (2) e (3), sendo como o transporte de cargas consolidadas (*full truckload*), ou seja, vai enviar uma entrega apenas da origem ao destino, sem outras paradas, do fluxo  $x_{1j}$  ao  $x_{in}$ .

Em (4) mostra as iterações do modelo, na primeira iteração o vértice destino é o vértice com menor custo a partir da origem, se este for o vértice  $t$ , então estará resolvido o problema, senão esse vértice destino se torna a origem até chegar em  $t$ , somando todos os custos.

Em (5) o fluxo  $x_{ij}$  não pode ser negativo (WILHELM, 2022; SOUZA, 2015).

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta os conceitos e a importância da gestão ambiental, logística, logística verde, Pesquisa Operacional, Problema de Caminhos Mínimos e o algoritmo de Dijkstra.

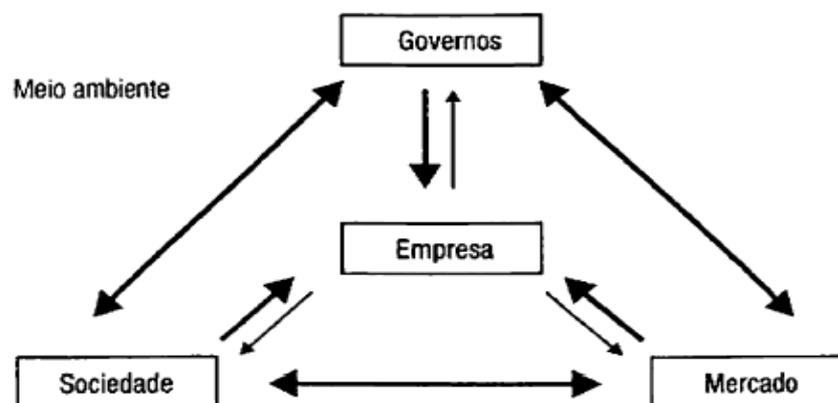
#### 3.1 GESTÃO AMBIENTAL

As empresas preocupam-se com a utilização de seus recursos produtivos a fim de preservar o meio ambiente, essa perspectiva teve início na Conferência sobre Biosfera realizada em Paris no ano de 1968, que tinha por objetivo o uso sustentável da Biosfera, ao qual resultou em 1971 na criação do programa, Homem e a Biosfera, visando estabelecer uma melhor harmonia do homem com a natureza (O ECO, 2014; NAIME e ANDARA, 2013).

Há uma grande aderência de empresas na aquisição de meios produtivos, que consiste na redução do impacto ambiental, principalmente para atender às exigências de seus *stakeholders* (governo, sociedade, mercado, entre outros), fazendo assim, que as empresas modifiquem seus processos, para que cada produto fabricado e transportado possa ter o menor impacto ambiental possível (BÁNKUTI e BÁNKUTI, 2014).

A relação dos *stakeholders* com a gestão ambiental nas empresas é mostrada na FIGURA 1:

FIGURA 1 – GESTÃO AMBIENTAL EMPRESARIAL -- INFLUÊNCIAS.



FONTE: BARBIERI (2007), p. 113.

A gestão ambiental é um sistema de administração empresarial que visa o uso correto de recursos renováveis e não renováveis de forma a não prejudicar as gerações futuras, garantindo que seus recursos sejam devidamente usados, evitando desperdícios e destinando corretamente os resíduos de produção, impedindo a degradação do meio ambiente (NAIME e ANDARA, 2013).

A FIGURA 2 mostra alguns exemplos de recursos renováveis, não renováveis e casos onde os recursos são tanto renováveis quanto não renováveis:

FIGURA 2 -- RECURSOS NATURAIS -- TIPOS E EXEMPLOS.

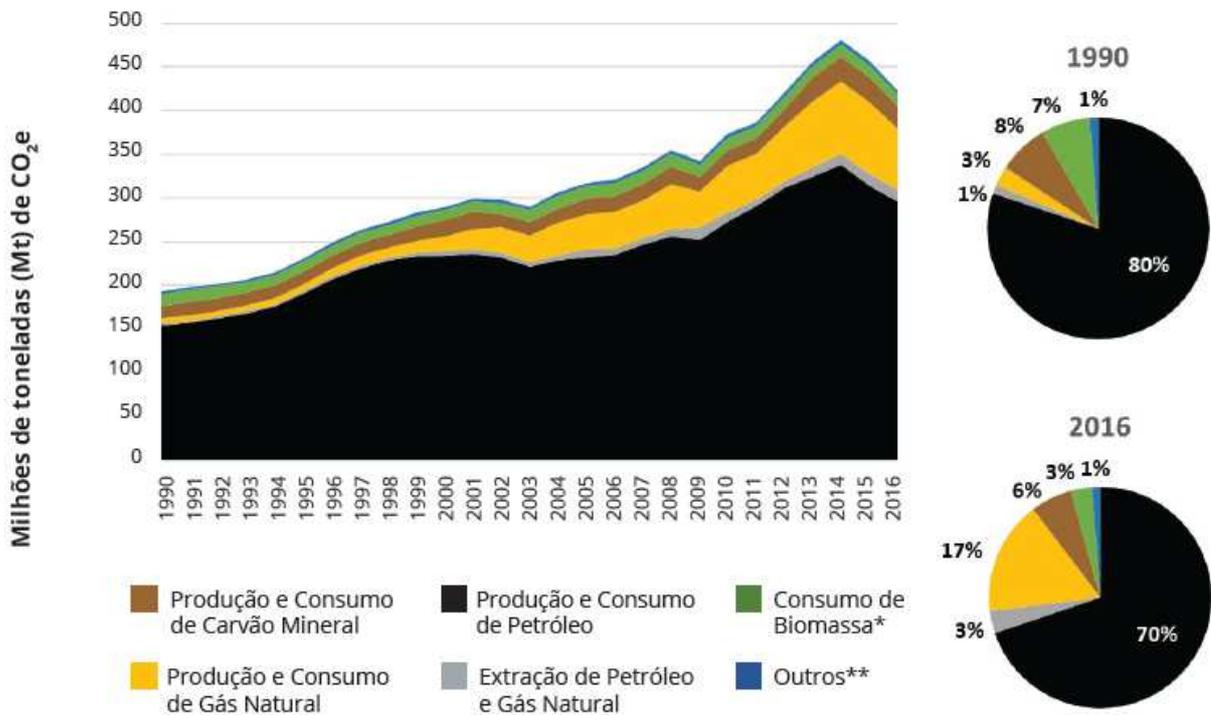


FONTE: BARBIERI (2007), p. 9.

Um dos recursos mais usados nos dias de hoje é o petróleo, sendo ele um recurso não renovável, é consumido no dia a dia pelas pessoas principalmente na forma de combustível em veículos automotores, o que causa grande emissão de gases como, por exemplo, o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (BARBIERI, 2007).

As emissões de  $CO_2$  equivalente devido a produção e consumo do petróleo chegou a 70% em 2016, conforme mostrado no FIGURA 3.

FIGURA 3 – EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO SETOR DE ENERGIA



\* As emissões de  $CO_2$  geradas pelo consumo de biomassa correspondem às emissões de metano ( $CH_4$ ) e óxido nitroso ( $N_2O$ ). As emissões de  $CO_2$  desses combustíveis não são contabilizadas no Setor de Energia, pois se considera que essas emissões são compensadas pela absorção de  $CO_2$  na fotossíntese que gerou a biomassa, conforme recomendação do IPCC.

\*\*Trata-se das emissões de  $CH_4$  e  $N_2O$  das misturas de gasolina automotiva com etanol anidro (gasolina C) e de diesel mineral com biodiesel (óleo diesel).

FONTE: SEEG 2018, p.16.

A TABELA 1 mostra como são classificados as emissões de gases como o  $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ , dentre outros, em dióxido de carbono equivalente ( $CO_2e$ ) através do potencial de aquecimento global (do inglês, *Global Warming Potential*), que converte o valor de emissão de um gás para a massa igual a do  $CO_2$ .

TABELA 1 – CONVERSÃO DE GASES ESTUFA PARA  $CO_2e$ 

Gases de Efeito Estufa (GEE)	Fator GWP
$CO_2$	1
$CH_4$	21
$N_2O$	310
$CF_4$	6.500
$C_2F_6$	9.200
$SF_6$	23.900

FONTES: EIDELMAN (2009)

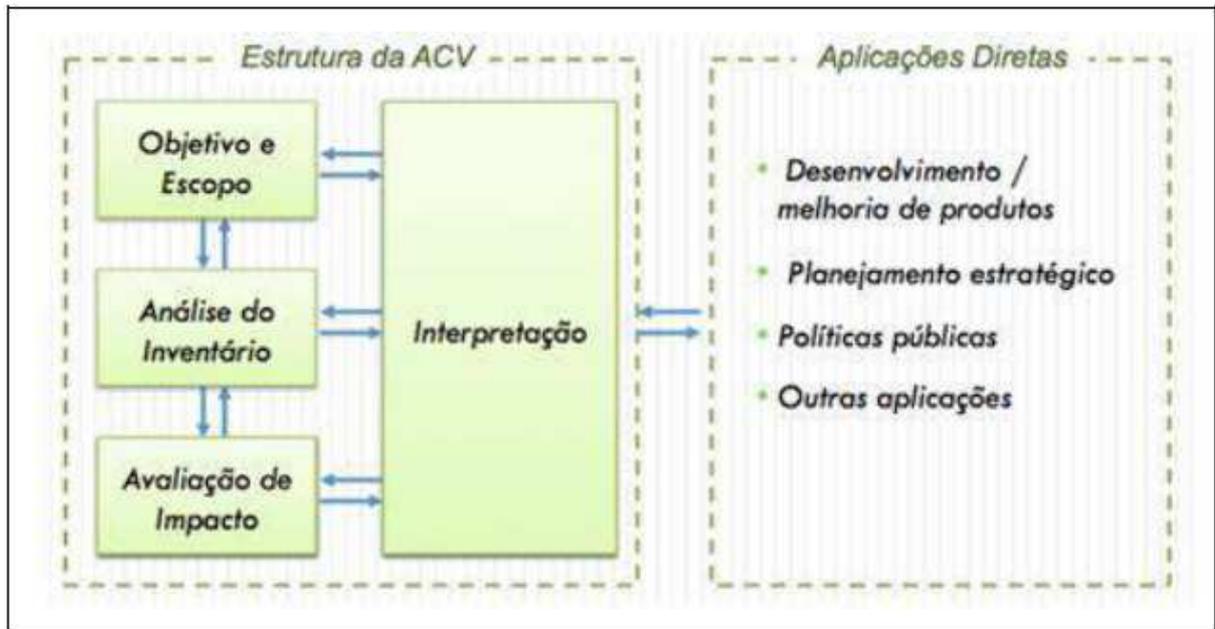
Por mais que o uso de recursos renováveis tenha aumentado (biomassa), o aumento no uso do carvão mineral e principalmente do petróleo tem agravado muito a elevação de  $CO_2$  no Brasil (SEEG, 2018). A maior utilização da biomassa (principalmente em veículos automotores (biocombustíveis)) nas empresas e no dia a dia das pessoas, pode reduzir muito a emissão de gases estufa, preservando a vida e os recursos não renováveis (CHAVES e GOMES, 2012; GAZZONI, 2007).

Deste modo, a busca por uma imagem amigável ecologicamente pelas empresas pode ser satisfeita, na maioria das vezes, quando a mesma passa a possuir selos ambientais em seus produtos, como a ISO 14001 (*International Organization for Standardization* ou Organização Internacional para Padronização) que consiste em um sistema de normas que a empresa deve seguir a fim que ela opere sem prejudicar gradativamente o meio ambiente (SEIFFERT, 2011).

Outro exemplo de selo ambiental são as ISO 14064, 14065 e 14066 que apresentam normas para diminuição de gases de efeito estufa, visando à redução da emissão de  $CO_2$  no transporte de cargas empresarial (SEIFFERT, 2011). Há também os selos ISO 14040 e 14044 que apresentam os requisitos e metodologias para avaliação do ciclo de vida de um produto (ACV), que é uma ferramenta usada para analisar todo o processamento, transporte, e uso de um produto, até o descarte do mesmo em forma de resíduo (LOVÓN-CANCHUMANI et al, 2015).

A FIGURA 4 mostra a estrutura do ACV.

FIGURA 4 – ESTRUTURA METODOLÓGICA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)



FONTE: ABNT/NBR ISO 14040 (2009) apud LOVÓN-CANCHUMANI et al (2015), p. 18.

Uma das análises feitas ao utilizar o ACV são as mudanças climáticas provocadas pela produção e consumo de um determinado produto, sendo prejudicial à saúde humana e aos ecossistemas. O elevado volume de gases emitidos pode acarretar em aumento da temperatura média no planeta, elevação do nível dos mares, chuvas ácidas, perda da biodiversidade, entre outros impactos ambientais. O uso do ACV pode ajudar as empresas a identificarem os impactos ambientais pela produção de seus produtos, fazendo assim que as mesmas tomem medidas corretivas para melhorar o modo como produzem sem agredir tanto o meio ambiente (LOVÓN-CANCHUMANI et al, 2015).

### 3.2 LOGÍSTICA

Durante a Segunda Guerra Mundial, exércitos utilizaram de técnicas logísticas para obter uma melhor vantagem em relação aos seus oponentes, fazendo assim um melhor controle de armamentos, de suprimentos aos soldados, entre outras técnicas que melhoraram a condição dos soldados nas guerras. Atualmente as empresas ainda usam a mesma perspectiva que as tropas militares para obter vantagens em seus produtos em relação aos seus concorrentes, mas

com foco na redução de custos, em uma logística bem planejada, podendo fazer com que as empresas melhorem suas imagens no mercado (LEITE et al, 2017).

Assim logística pode ser definida como uma especialidade da administração que se preocupa em um planejamento de todo o processo de produção desde a matéria prima até a entrega do produto ao cliente, buscando sempre custo mínimo e abrangendo as necessidades dos *stakeholders*. (BALLOU, 2006).

Mas foi no final do século XX e início do XXI que a logística obteve um grande avanço, devido principalmente ao desenvolvimento de novas tecnologias como, por exemplo, os computadores, uma rede mundial de comunicação e melhorias nos meios de transporte, que fez com que o tempo de processamento, manuseio de materiais, estocagem de produtos e transporte dos mesmos se tornassem mais rápidos, levando assim as empresas a fabricar mais com menos estoque e entregar seus produtos de forma mais rápida e segura ao cliente final do que em comparação a década de 1990, onde o tempo de transporte do produto demorava-se muito, podendo levar meses para o produto chegar às mãos dos clientes, gerando assim um alto volume de estoque na empresa (BOWERSOX *et. al.*, 2014).

As melhorias nos meios de transporte fizeram com que as mercadorias das empresas chegassem a qualquer parte do mundo muito mais rápido, devido a um melhor uso dos cinco modais (rodoviário, hidroviário, dutoviário, ferroviário e aéreo), além de novos aviões, caminhões, navios, trens, entre outros, que foram melhores desenvolvidos do que na década de 1990, aumentando assim o custo de transporte, o que atualmente soma 60% dos custos logísticos de uma empresa (somente o transporte de produto acabado ao cliente final), fazendo assim com que as empresas tomem medidas preventivas para reduzir parte dos custos (BOWERSOX *et. al.*, 2014).

No que tange as medidas preventivas, a empresa pode optar por escolher qual meio de transporte ela utilizará para a transportação de suas mercadorias, entre os cinco modais, o mais utilizado no Brasil é o modal rodoviário, sendo cerca de 90% do transporte de cargas e passageiros é feito através desse modal (ILOS, 2019). Uma das escolhas que a empresa deve tomar depende em buscar custos fixos e variáveis menores para o transporte logístico da mesma (BALLOU, 2006).

O QUADRO 1 mostra a estrutura dos custos fixos e variáveis de cada modal:

QUADRO 1 – ESTRUTURA DE CUSTOS DE CADA MODAL

<b>Ferrovário</b> : Alto custo fixo de equipamentos, terminais, trilhos etc. Baixo custo variável.
<b>Rodoviário</b> : Baixo custo fixo (estradas prontas e fornecidas pelo dinheiro público). Custo variável médio(combustível, manutenção, etc.).
<b>Hidroviário</b> : Custo fixo médio(navios e equipamentos). Baixo custo variável (capacidade de transportar grande quantidade de carga).
<b>Dutoviário</b> : Custo fixo mais alto de todos (dutos, faixas de domínio, construção, necessidade de estações de controle e capacidade de bombeamento). Custo variável mais baixo de todos (não há custo de mão de obra significativo).
<b>Aéreo</b> : Baixo custo fixo (aeronaves e sistemas de manuseio e carga). Alto custo variável (combustível, Mão de obra, manutenção etc.).

FONTE: BOWERSOX *et. al.* (2014, p.211).

São considerados como custos fixos aqueles que não afetam diretamente o transporte do produto, já os custos variáveis afetam diretamente, pois eles são essenciais para que o transporte ocorra. Outra pauta que a empresa também deve levar em consideração para a escolha do modal é a velocidade de entrega da mercadoria como também a disponibilidade de entrega do modal em atender qualquer local, a confiabilidade e a frequência do mesmo em atender vários locais sem perder tempo por conta de tráfego que pode ocorrer e a capacidade de quantos produtos o veículo pode suportar (BOWERSOX *et. al.*, 2014).

A TABELA 2 mostra a comparação entre cada modal em relação à velocidade, disponibilidade, confiabilidade, frequência e capacidade:

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS RELATIVAS POR MODAL DE TRANSPORTE\*

<b>Características Operacionais</b>	<b>Ferrovário</b>	<b>Rodoviário</b>	<b>Hidroviário</b>	<b>Dutoviário</b>	<b>Aéreo</b>
Velocidade	3	2	4	5	1
Disponibilidade	2	1	4	5	3
Confiabilidade	3	2	4	1	5
Capacidade	2	3	1	5	4
Frequência	4	2	5	1	3
Total	14	10	18	17	16

\*A classificação mais baixa é a melhor.

FONTE: BOWERSOX *et. al.* (2014, p.211).

Conforme a tabela 1 o modal rodoviário teve o melhor resultado, mesmo não obtendo grande capacidade para carregar grandes cargas, apresenta melhor disponibilidade e uma boa velocidade para o transporte, além de boa confiabilidade e frequência fazendo assim um atendimento rápido aos clientes, esse modal

também apresenta custo fixo baixo, já que as estradas são feitas pelo governo (dinheiro público) e custo variável relativamente alto, já que gera alto índice de manutenção e uso de combustível que pode acarretar um custo elevado a empresa (BOWERSOX *et. al.*, 2014).

Como o volume de uso do modal rodoviário no Brasil é muito elevado, pode-se dizer que as empresas do país estão obtendo bons resultados em relação às características operacionais do mesmo, mas que em relação à poluição a situação é bem diferente, já que em 2016 foi registrado que o transporte de cargas e passageiros realizado neste modal emitiu aproximadamente 184  $MtCO_2$  (Milhões de toneladas métricas de  $CO_2$ ). Em comparação, o transporte realizado no modal hidroviário emitiu cerca de 2  $MtCO_2$ , enquanto no aéreo e no ferroviário emitiram cerca de 10  $MtCO_2$  e 3  $MtCO_2$  respectivamente (SEEG, 2018). Desta forma, uma melhor distribuição dos cinco modais para o transporte no Brasil, diminuirá a emissão de gases tóxicos principalmente nas grandes cidades (SEEG, 2018; ILOS, 2019).

### 3.2.1 Logística Verde

A otimização verde surgiu no final do século XX, com o intuito de minimizar os agentes poluidores, e também a cautela com os recursos renováveis e não renováveis, por conta do aumento de poluição causado pelos gases gerados por combustíveis fósseis (ALVARENGA e RODRIGUES, 2018).

A logística reversa é uma área específica da logística verde que visa como meta o reaproveitamento de produtos que foram vendidos e já atingiram sua vida útil, dando a destinação necessária a eles ou desenvolvendo um novo produto a partir desse. Ela também pode ser aplicada no transporte rodoviário, por exemplo, um caminhoneiro que se desloca da empresa em que trabalha para entrega dos produtos fabricados até o cliente, a aplicação da logística reversa nesse caso é o fato que ao ele usar uma rota para entregar o produto ao cliente, o seu retorno deve ser feito utilizando outra rota para que assim haja redução nas emissões de gases na rota que ele utilizou na ida (ARAÚJO *et al.*, 2017).

A FIGURA 5 mostra uma melhor definição de logística verde como também a relação que a mesma faz com a economia, ambiente e sociedade:

FIGURA 5 – RELACIONAMENTO ENTRE A LOGÍSTICA VERDE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL



FONTE: ALVARENGA e RODRIGUES (2018, p.50).

Desta forma nota-se que a logística verde está interligada com as relações sustentáveis de maneira que visa à mudança das empresas em utilizarem recursos renováveis como, por exemplo, a troca do uso da energia gerada por termoelétricas para o uso da eólica ou solar. Outro ponto é a redução do uso de combustíveis fósseis em veículos automotores, já que as atividades de transporte somam cerca de 25% das emissões de  $CO_2$  jogados na atmosfera mundialmente, para o uso de biocombustíveis, o qual é fabricado através de óleos vegetais ou de animais e sua emissão pode chegar a 70% menos  $CO_2$  comparado ao diesel (GAZZONI, 2007; BRITO, 2018). Outro ponto é que a logística verde busca rotas que levam em consideração não apenas tempo e custo mínimo, mas também visam encontrar rotas com emissão mínima de  $CO_2$ . Além disso, a logística verde busca também condições mais seguras de trabalho tanto no processo do produto quanto no transporte do mesmo da forma que não ocorra acidentes (ALVARENGA e RODRIGUES 2018).

### 3.3 PESQUISA OPERACIONAL

Diversos problemas militares ocorreram durante os eventos da Segunda Guerra Mundial, principalmente para melhorar o uso dos recursos disponíveis,

desenvolvendo assim métodos matemáticos para solucionar tais problemas, onde assim surgiu a Pesquisa Operacional (PO) (BARCELOS *et. al.*, 2012).

A PO se caracteriza por fazer uso de modelos matemáticos a fim de auxiliar na tomada de decisão de algum problema complexo ocorrido, buscando assim a solução ótima desse problema (ARENALES *et. al.*, 2015). Tais modelos são formados por um conjunto de variáveis de decisão (valores desconhecidos, que só serão identificados após a resolução do problema), por restrições (equações e inequações) que o problema deve obedecer e por uma função objetivo, o qual poderá ser de minimização, por exemplo, reduzir o custo de processamento de um produto, ou de maximização como, por exemplo, aumentar o lucro de uma empresa (ARAÚJO *et. al.*, 2017).

Atualmente as empresas utilizam muito a PO como vantagem competitiva para suas concorrentes, melhorando o processo de produção da empresa como, por exemplo, resolvendo problemas de corte, de empacotamento, e principalmente problemas de rotas, onde as empresas buscam caminhos mínimos para o transporte de seus produtos a fim de reduzir custos e conseqüentemente aumentar o faturamento (ANDRADE, 2018).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o enquadramento do trabalho quanto à natureza, objetivos, abordagem e procedimentos, como também as ferramentas utilizadas para a coleta de dados e análise dos resultados.

### 4.1 ENQUADRAMENTO DA PESQUISA

Uma pesquisa é propor possíveis soluções para um determinado problema que pode ser classificado quanto a sua natureza, como uma pesquisa básica que se caracteriza por produzir novos conhecimentos buscando resultados de interesses globais, ou como uma pesquisa aplicada que tem por objetivo originar novos conhecimentos práticos, visando à resolução de problemas de interesse específico (SILVA e MENEZES, 2005).

Outra categoria dada a uma pesquisa é quanto aos seus objetivos, que pode ser de forma exploratória que visa a melhor compreensão de um problema, seja por meio de entrevistas ou através da bibliografia, outra forma é a descritiva que pretende apresentar como é feito, analisado e reconhecido determinado processo, já o objetivo explicativo propõe a interpretação do porque ocorre determinado processo, outra forma é a normativa que visa à construção de novos modelos de solução a partir de um problema real, ou seja, melhorar o problema já existente (SILVA e MENEZES, 2005; TURRIONI E MELLO, 2012).

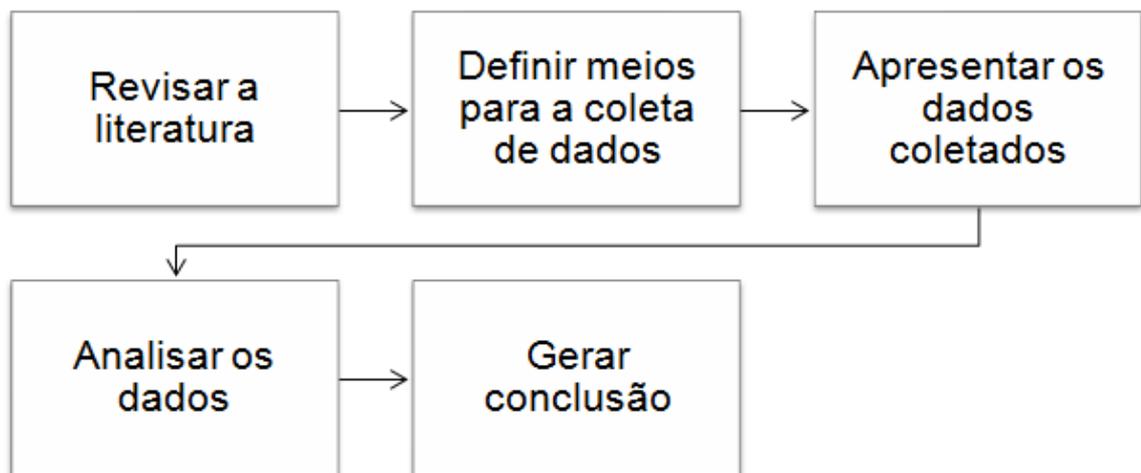
Há também a condição de uma pesquisa quanto a sua abordagem, que pode ser tanto qualitativa, que apresenta uma maneira não numérica de descrever a ocorrência de um processo, ou quantitativa que propõe identificar, analisar e levantar hipóteses para resolução de um problema utilizando o auxílio de ferramentas numéricas (SILVA e MENEZES, 2005).

Esse trabalho é classificado por ser uma pesquisa de natureza aplicada, com objetivos normativos e abordagem quantitativa, já que a proposta é desenvolver um modelo de rotas que minimizem as emissões de  $CO_2$  no modal rodoviário, utilizando de dados numéricos de distância, velocidade e inclinação de um roteirizador convencional (Google Maps) para análise e resolução do problema de pesquisa.

Quanto aos procedimentos do trabalho, o mesmo se caracteriza como sendo uma modelagem, que é propor modificações ou melhorias a um determinado problema real, assim essa pesquisa pretende esclarecer se roteirizadores convencionais cria rotas sustentáveis considerando apenas o tempo mínimo como variável de decisão ou se o modelo desenvolvido nesse trabalho pode ser uma ferramenta alternativa para o transporte rodoviário. (TURRIONI E MELLO, 2012).

A FIGURA 6 mostra as etapas da modelagem utilizadas nesse trabalho:

FIGURA 6 – ETAPAS DA MODELAGEM



FONTE: O autor (2022).

Etapa 1: é feita uma revisão sobre os temas relacionados ao trabalho a fim de dar suporte para possíveis soluções para a pergunta de pesquisa.

Etapa 2: aqui é definido como será realizado a coleta de dados.

Etapa 3: uso dos dados coletados para determinar a taxa de emissão do veículo através das fórmulas encontradas em Demir *et. al.* (2011).

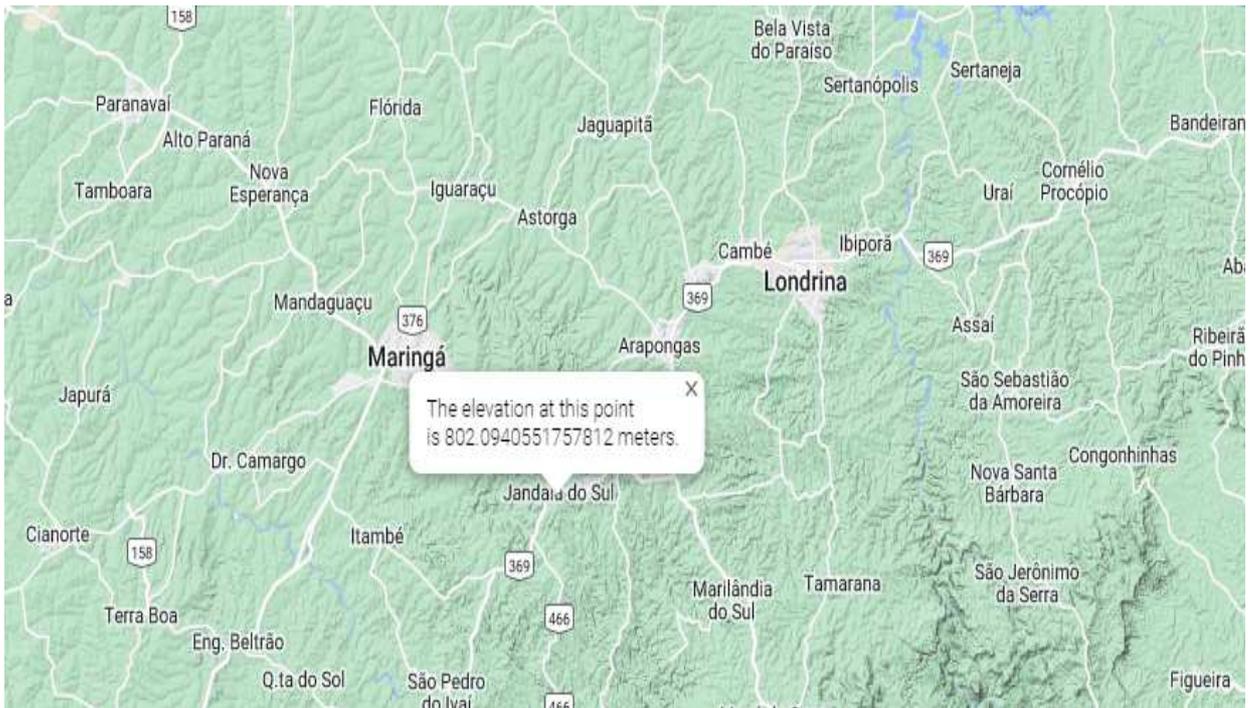
Etapa 4: usar métodos matemáticos (algoritmo de Dijkstra) para resolução do problema de pesquisa.

Etapa 5: aqui será respondida a pergunta de pesquisa.



funcionalidades) (SCUSSEL, 2013), como por exemplo, criar rotas no Google Maps entre o vértice 1 e 2 e desde modo coletar os dados de distância e tempo. O relevo foi coletado usando a ferramenta Plataforma Google Maps (do inglês *Google Maps Platform*) que é uma ferramenta mais completa de mapeamento, que é mostrada na FIGURA 8.

FIGURA 8 – RELEVO DA REGIÃO NORTE DO PARANÁ



FONTE: GOOGLE MAPS PLATFORM (2022).

A coleta de dados do relevo foi feita fazendo a diferença entre as elevações ao nível do mar de um vértice ao outro, coletados na ferramenta do Google e após isso calculando o ângulo de inclinação entre os vértices, usando a equação do triângulo retângulo (equações 6 a 8), sendo o cateto oposto à elevação e o adjacente a distância entre os vértices (SANTOS, 2018).

$$\text{tangente} (\theta) = \frac{\text{cateto oposto}}{\text{cateto adjacente}} \quad (6)$$

$$\tan(\theta) = \frac{\text{elevação (vértice } n) - \text{elevação (vértice } n + 1)}{\text{distância entre } (n \text{ e } n + 1)} \quad (7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\text{elevação (vértice } n) - \text{elevação (vértice } n + 1)}{\text{distância entre } (n \text{ e } n + 1)} \right) \quad (8)$$

Sendo  $\theta$  o ângulo de elevação das vias em graus ( $^{\circ}$ ) e  $n$  o número corresponde ao vértice usado (1,2,3..). Ao todo se soma 142 vias na região norte do Paraná (matriz de 142 linhas x 142 colunas), o que torna possível a resolução deste problema através do uso de um modelo operacional exato (Caminho Mínimo), que garante a melhor solução ótima possível.

#### 4.3 FERRAMENTAS DE ANÁLISE

Os dados das velocidades, distâncias e inclinações coletados foram computados no Excel (ferramenta utilizada para criação de planilhas virtuais, desenvolvido pela Microsoft em 1987 (MEYER, 2013)) para encontrar a taxa de emissão de  $CO_2$  gerada por veículos leves e pesados na região norte do Paraná, foram usadas as fórmulas encontradas no trabalho de Demir *et. al.* (2011, p. 349-350) e Paschoal (2015, p.38-39) (equações 9, 17 e 21), Barros (2018) (equação 28), Sharp (2012) (equação 20) e Silva (2022) (equações 18 e 19).

$$P_{tração} = \frac{(Ma + Mgsen \theta + 0,5C_a\rho Av^2 + MgC_r \cos \theta)v}{1000} \quad (9)$$

$P_{tração}$ : potência de tração (kW);

$M$  = peso do caminhão (kg);

$v$  = velocidade em cada via (m/s);

$a$  = aceleração em cada via ( $m/s^2$ );

$A$  = área frontal de superfície do caminhão ( $m^2$ );

$g$  = gravidade (aproximadamente  $9,81 m/s^2$ );

$C_a$  = coeficiente de arrasto aerodinâmico (adimensional);

$C_r$  = coeficiente de resistência ao rolamento (adimensional);

$\rho$  = densidade do ar (aproximadamente  $1,2041 kg/m^3$ );

$\theta$  = ângulo de elevação das vias (em graus ( $^{\circ}$ ));

A velocidade e a aceleração podem ser calculados pelas fórmulas 10 e 11, segundo Halliday et al (2009):

Onde:

$$\Delta v = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (10)$$

$$\Delta a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (11)$$

d = distância entre cada vértice (m);

t = tempo (s).

O coeficiente de resistência ao rolamento pode ser calculada através das fórmulas 12 e 13 encontradas em Gali (2015, p.22-24).

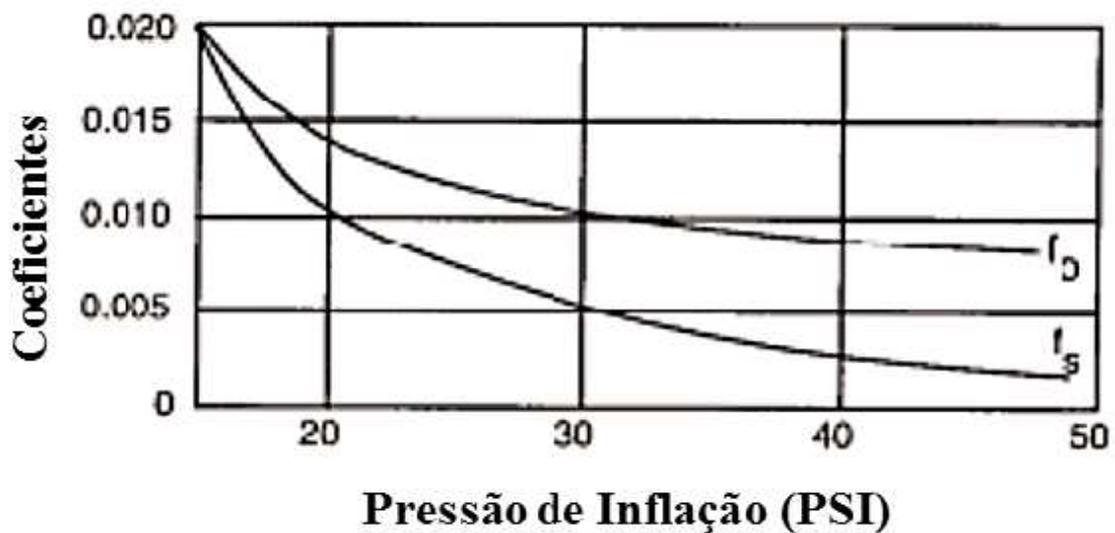
Para veículos leves o  $C_r$  é:

$$C_r = f_o + 3,24 * f_s \left(1 + \frac{v}{100}\right)^{2,5} \quad (12)$$

Sendo  $f_o$  o coeficiente de base,  $f_s$  o coeficiente de efeito de velocidade e v a velocidade em milhas por hora (mph).

A FIGURA 9 mostra como encontrar os coeficientes.

FIGURA 9 – COEFICIENTES PARA A EQUAÇÃO DO  $C_r$



FONTE: GILLESPIE (1992) apud GALI (2015, p.23).

Para veículos pesados o  $C_r$  é:

$$C_r = (0,0041 + 0,000041v)C_{rr} \quad (13)$$

Onde a velocidade  $v$  é em mph e  $C_{rr}$  é o coeficiente relativo ao tipo de superfície do pavimento.

O  $C_{rr}$  pode ser encontrado através da TABELA 3:

TABELA 3 – COEFICIENTE RELATIVO AO TIPO DE SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO

Superfície do Pavimento	Crr
Concreto liso	1,0
Concreto desgastado e asfalto frio	1,2
Asfalto quente	1,5

FONTE: GILLESPIE (1992) apud GALI (2015, p.24).

O coeficiente de arrasto aerodinâmico e a área de superfície frontal podem ser calculados com as fórmulas 14 a 16 encontradas em Hoffmann (2019).

$$P = A C_a \rho \frac{v^3}{2} \quad (14)$$

$$C_a = \frac{2P}{A\rho v^3} \quad (15)$$

$$A = 0,85 l h \quad (16)$$

$l$ : a largura do veículo (m);

$h$ : a altura do veículo (m).

$$P = \frac{P_{tração}}{\eta} + P_a \quad (17)$$

$$\eta = \frac{P}{P_{total}} \quad (18)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{P_{tração}}{P_{total}}} \quad (19)$$

$P$  = potência de saída do motor (kW);

$\eta$  = eficiência de transmissão (adimensional);

$P_a$  = potência pelo uso de acessório, como o ar condicionado, rádio, dentre outros, para esse projeto esse valor será zero (kW);

$P_{total}$ : potência do motor do veículo (kW).

$$N = \left( \frac{v}{\frac{(2i p + (25,4r)\pi 0,06)}{\frac{R(d)}{R(L)}}} \right) \left( \frac{1000}{60} \right) \quad (20)$$

$N$ : rotação do motor (rps);

$i$ : largura do pneu (cm);

$p$ : porcentagem de altura do pneu em relação à largura ( $i$ );

$r$ : raio da roda (cm);

$R(d)$ : relação do diferencial do veículo (adimensional);

$R(L)$ : relação da marcha (adimensional).

$$T_c = \left( \frac{\Phi \left( kNV + \frac{P}{\eta_r} \right)}{44} \right) \left( \frac{\Delta t}{1000} \right) \quad (21)$$

$T_c$ : taxa de consumo de combustível (kg);

$\Phi$ : relação massa combustível/ar (adimensional);

$k$ : fator de atrito do motor (adimensional), normalmente o valor é 0,2;

$V$ : deslocamento do motor (L);

$\eta_r$ : rendimento de cada combustível no motor (adimensional), segundo Ruffo (2015), Feldman (2017), APROBIO (2017) e NovaCana (2022), o rendimento da gasolina é de aproximadamente 30%, para o etanol 21%, para o diesel 40% e para o biodiesel 36,4%.

A relação massa combustível/ar é calculada a partir das seguintes razões estequiométricas segundo Barros (2018) (equações 22 a 27).

$$\varepsilon = \frac{0,21}{\alpha + \frac{\beta}{4} + \omega - \frac{\gamma}{2}} \quad (22)$$

$$f_{a(est)} = \frac{PM_a}{\varepsilon * PM_c} \quad (23)$$

$$PM_a = 0,21O_2 + 0,79N_2 \quad (24)$$

$$PM_c = C\alpha + H\beta + O\gamma + N\delta + S\omega \quad (25)$$

$$\lambda = \frac{f_a}{f_{a(est)}} \quad (26)$$

$$\phi = \frac{1}{\lambda} \quad (27)$$

Sendo:

$f_{a(est)}$ : razão ar/combustível estequiométrica (adimensional);

$PM_a$ : peso molecular do ar (kg/kmol);

$PM_c$ : peso molecular do combustível (kg/kmol);

$\varepsilon$ : razão estequiométrica molar do combustível/ar e os coeficientes  $\alpha, \beta, \omega, \delta, \gamma$  a quantidade de moléculas de cada elemento, como por exemplo, a fórmula molecular do diesel é  $C_{16}H_{34}$ , desta forma o  $\alpha$  é igual a 16 e o  $\beta$  igual a 34 (adimensional);

$f_a$ : razão ar combustível com excesso de ar (mistura pobre) ou excesso de combustível (mistura rica) que ocorre quando o motor precisa de mais ar ou combustível para realizar completamente a combustão (adimensional);

$\lambda$ : a razão de equivalência ar/combustível (adimensional);

$\phi$ : razão de equivalência combustível/ar (adimensional) (BARROS, 2018).

$$T_e = \left( \frac{\alpha PM_g}{PM_c} \right) T_c \quad (28)$$

$T_e$ : taxa de emissão (kg de  $CO_2$ );

$PM_g$ : peso molecular do gás ( $CO_2, CO$ , entre outros) em kg/kmol;

Os veículos usados para os cálculos de taxa de emissão foram Renault Kwid flex Intense 2017 (gasolina e etanol) e a Scania G 320 B6X2\*4NB 2016 (diesel e

biodiesel), para a retirada dos dados relacionados ao motor (potência do motor, deslocamento do motor, relação do diferencial e da marcha, dentre outras especificações) conforme mostradas na FIGURA 10.

FIGURA 10 – ESPECIFICAÇÕES DOS VÉICULOS A) LEVE B) PESADO

A)	Versão Life	Versão Zen	Versão Intense
Arquitetura	Carroceria monobloco, monovolume, 5 passageiros, 5 portas		
Motor	Quatro tempos, três cilindros em linha, 12 válvulas, injeção multiponto, bicombustível (etanol e/ou gasolina) e refrigeração por circuito de água sob pressão		
Potência máxima (ABNT)	66 cv (gasolina) @ 5.500 rpm / 70 cv (etanol) @ 5.500 rpm		
Torque máximo (ABNT)	9,4 kgfm @ 4.250 rpm (gasolina) / 9,8 kgfm @ 4.250 rpm (etanol)		
Cilindrada	999 cm <sup>3</sup>		
Taxa de compressão	11,5:1		
Pneus/rodas	Roda de aço com calotas/ pneus 165/70 R14		
Suspensão dianteira	Tipo MacPherson, triângulos inferiores, amortecedores hidráulicos telescópicos e molas helicoidais		
Suspensão traseira	Eixo de torção, com molas helicoidais e amortecedores hidráulicos telescópicos verticais		
Freios	Sistema ABS, com discos sólidos na dianteira e freios traseiros com tambores		
Direção	Mecânica, diâmetro de giro de 10,0 m (elétrica como opcional a partir de setembro)	Elétrica, diâmetro de giro de 10,0 m	
Câmbio			
Relações de marcha	1ª..... 3,769:1		
	2ª..... 2,048:1		
	3ª.....1,290:1		
	4ª.....0,949:1		
	5ª.....0,791:1		
	Rª.....3,54:1		
	Diferencial.....4,38:1		
	Tanque de combustível	38 litros	
Porta-malas	290 litros		
Carga útil	375 Kg		
Peso (em ordem de marcha)	758 kg	779 Kg	786 Kg
Entre-eixos	2.423 mm		
Comprimento	3.680 mm		
Altura	1.474 mm		
Largura (sem retrovisores)	1.579 mm		
Altura livre do solo	180 mm		

Cab B)	CG16L	Turning radius	curb 8844 mm wall 9484 mm inner 5015 mm
Colour	Yellow RAS1032	Steering wheel adjustment	0-50° tilt, 60 mm slide
Cab suspension	4-point air	Frame	Scanla F950 width 770 mm flange height 270 mm thickness 9.5 mm
Engine	Scanla DC09 133 320 hp	Axle distance	4,700 mm
Engine output	235 kW (320 hp) at 1,900 rpm 1,600 Nm at 1,050 - 1,300 rpm	Noise certification	Plek certified
Injection system	Scanla XPI	Chassis number	2121103
Cylinders	Inline five		
Bore x Stroke	130 x 140 mm		
Engine compression ratio	18 : 1		
Emission control	Scanla DOC, DPF, SCR, ASC		
Emission level	Euro 6		
Noise level	80 dBA		
Gearbox	Scanla E-GRS895 with integrated electric motor		
Electric motor output	130 kW (174 hp) and 1050 Nm torque		
Usable battery capacity	1.2 kWh Li-Ion battery (full battery capacity 4.8kWh)		
Gearchanging system	2-pedal Scanla Opticruise		
Performance modes	Power, Standard, Economy		
Rear axle gear	Scanla R780 single reduction		
Rear axle ratio	2.92		
Tyres front	315/70 R22.5		
Tyres rear	315/70 R22.5		
Rear axle	4-bellow air, 11,500 + 7,500 kg		
Front axle	Air/Low, 8,000 kg		
Steering type	Recirculating ball, hydraulically assisted		
Steering ratio	17 - 20:1		
Steering angles	LH Inner 48.0 LH outer 34.1 RH Inner 50.0 RH outer 43.9		

FONTE: RENAULT (2017) e SCANIA (2016)

Os valores calculados de rendimento do motor e peso molecular do combustível foram decisivos para determinar os valores de consumo e emissão de  $CO_2$  para cada combustível utilizado. O modelo operacional deste trabalho é similar ao Problema do Caminho mínimo apresentado no capítulo dois, onde  $c_{ij}$  é a taxa de emissão/consumo de combustível a ser minimizada. Para resolução do problema desse projeto será usado equações feitas em Excel que simulam o algoritmo de Dijkstra como mostrado na FIGURA 11.

FIGURA 11 – RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE CAMINHO MÍNIMO PARA MINIMIZAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

- A)  $=SE(B2=" ";99999;B2)$
- B)  $=SE(CONT.SE(\$PQ\$1:\$PQ2;HJ\$1)=1;99999;MÍNIMO(HJ2;SEERRO(ÍNDICE(\$B\$218:\$HG\$431;CORRESP(\$PR3;\$A\$218:\$A\$431;0);CORRESP(HJ\$1;\$B\$217:\$HG\$217;0))+\$PP2;HJ2)))$
- C)  $=SEERRO(MÍNIMO(HI3;PO3);0)$
- D)  $=ÍNDICE(\$HI\$1:\$PO\$1;1;CORRESP(PP3;HI3;PO3;0))$
- E)  $=SEERRO(SE(OU(PU12=\$HI\$1;PU12=" ");" ";PROCH(PU12;\$HI\$1:\$PO\$218;218;FALSO));" ")$
- F)  $=ÍNDICE(PP2;PP214;CORRESP(PT216;PQ2:PQ214;0);1)$

FONTE: O autor (2022)

Em A) Colocar valores bem altos para aqueles pontos da matriz quadrada com n linhas e n colunas (n sendo 1,2,3...) que não possui nenhum valor, ou seja, evitando a geração de rotas que não existem;

Em B) cria uma nova matriz com todas as possíveis rotas que podem ser geradas com a matriz anterior;

Em C) retorna o menor valor de cada linha da matriz em B);

Em D) forma-se o caminho correspondente para cada valor em C);

Em E) cria o caminho selecionado para cada vértice de destino;

Em F) mostra o custo total da rota gerada (emissão de CO<sub>2</sub>/consumo de combustível).

#### 4.4 ALGORITMO DE DIJKSTRA

Edsger Wybe Dijkstra desenvolveu em 1959 um algoritmo que pretende buscar o caminho mais curto entre uma origem fixa e qualquer outro nó de um grafo, desde que nenhum peso associado ao arco seja negativo (MÉNDEZ E GUARDIA, 2008).

O pseudocódigo do algoritmo de Dijkstra é dado a seguir através das equações 29 a 42 segundo Souza (2015, p.23), sendo N o número de nós  $N = \{1,2,\dots,n\}$ , A o número de arcos  $A = \{1,2,\dots,m\}$ , p(i) o predecessor de i e cij o custo do arco (i, j):

Entrada: Grafo  $G = (N, A)$ , nós de origem  $s$  e destino  $t$ .

Saída: Árvore de caminhos mínimos a partir de  $s$ .

1 Para cada nó  $v \in N$  faça (29)

2         $c(v) \leftarrow \infty$  (30)

3         $p(v) \leftarrow \text{indefinido}$  (31)

4  $c(s) \leftarrow 0$  (32)

5  $Q \leftarrow s$  (33)

6 enquanto  $Q \neq \emptyset$  faça (34)

7        seleciona o nó  $i \in Q$  que apresenta menor  $c(i)$  (35)

8         $Q \leftarrow Q \setminus \{i\}$  (36)

9        para cada  $j \in A(i)$  faça (37)

10             $c' \leftarrow c(i) + c_{ij}$  (38)

11            se  $c' < c(j)$  então (39)

12                     $c(j) \leftarrow c'$  (40)

13                     $p(j) \leftarrow i$  (41)

14                     $Q \leftarrow Q \cup \{j\}$  (42)

O algoritmo inicia-se com o nó origem tendo um custo  $c(v) = 0$  e todos os outros nós do grafo tendo um  $c(v) = \infty$ , a partir disso o algoritmo busca na primeira iteração o menor custo entre o nó de origem ( $s$ ) e os demais nós, onde o nó que estiver com menor custo e não é o nó destino ( $t$ ) assume como nó origem na segunda iteração repetindo a busca até que o algoritmo encontre o nó destino (SOUZA, 2015).

## 5 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Neste capítulo são apresentadas as rotas geradas pelo modelo proposto nesse trabalho, comparando as emissões de  $CO_2$  e o consumo de combustível com as rotas do Google Maps em três diferentes tipos de rotas (planas, elevadas e mistas).

### 5.1 ROTAS PLANAS

Os vértices que apresentam valores de elevação próximos serão chamados de “rotas planas”, sendo:

O vértice origem a cidade de Jandaia do Sul;

A rota 1 o vértice destino é a cidade de Nova Esperança;

A rota 2 o vértice destino é a cidade de Santa Fé;

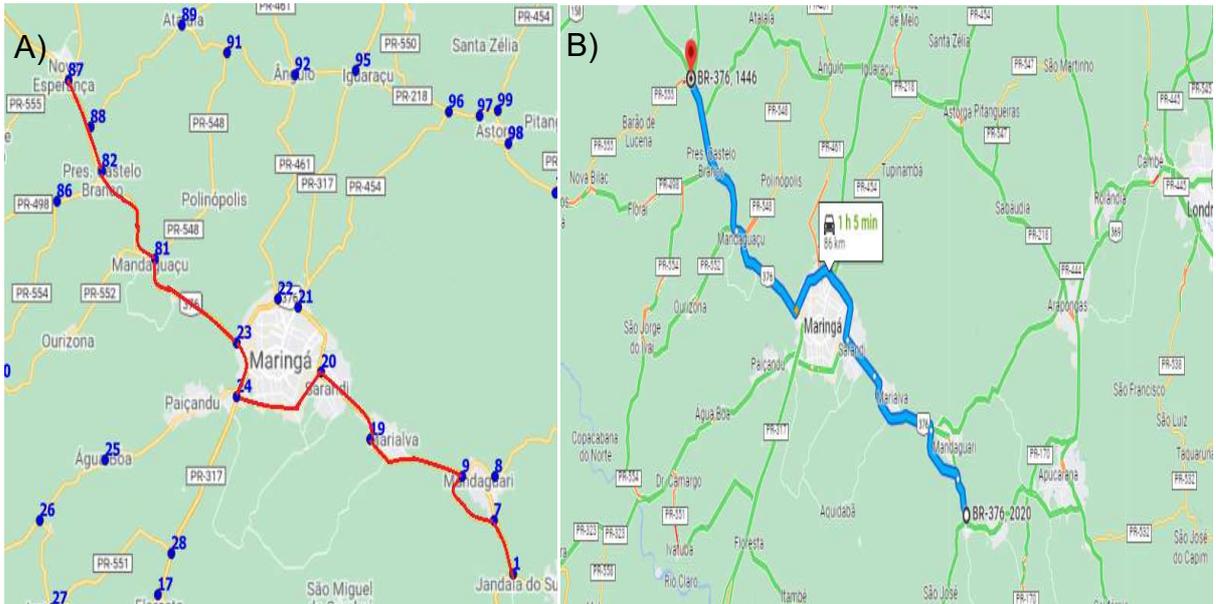
A rota 3 o vértice destino é a cidade de Ângulo;

A rota 4 o vértice destino é a região da cidade de Iretama.

#### 5.1.1 Rota 1

A FIGURA 12 mostra a rota gerada pelo modelo proposto que vai da origem (vértice 1) cidade de Jandaia do Sul até o destino (vértice 87) cidade de Nova Esperança.

FIGURA 12 – A) ROTAS DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ NOVA ESPERANÇA;  
B) ROTAS DO GOOGLE MAPS

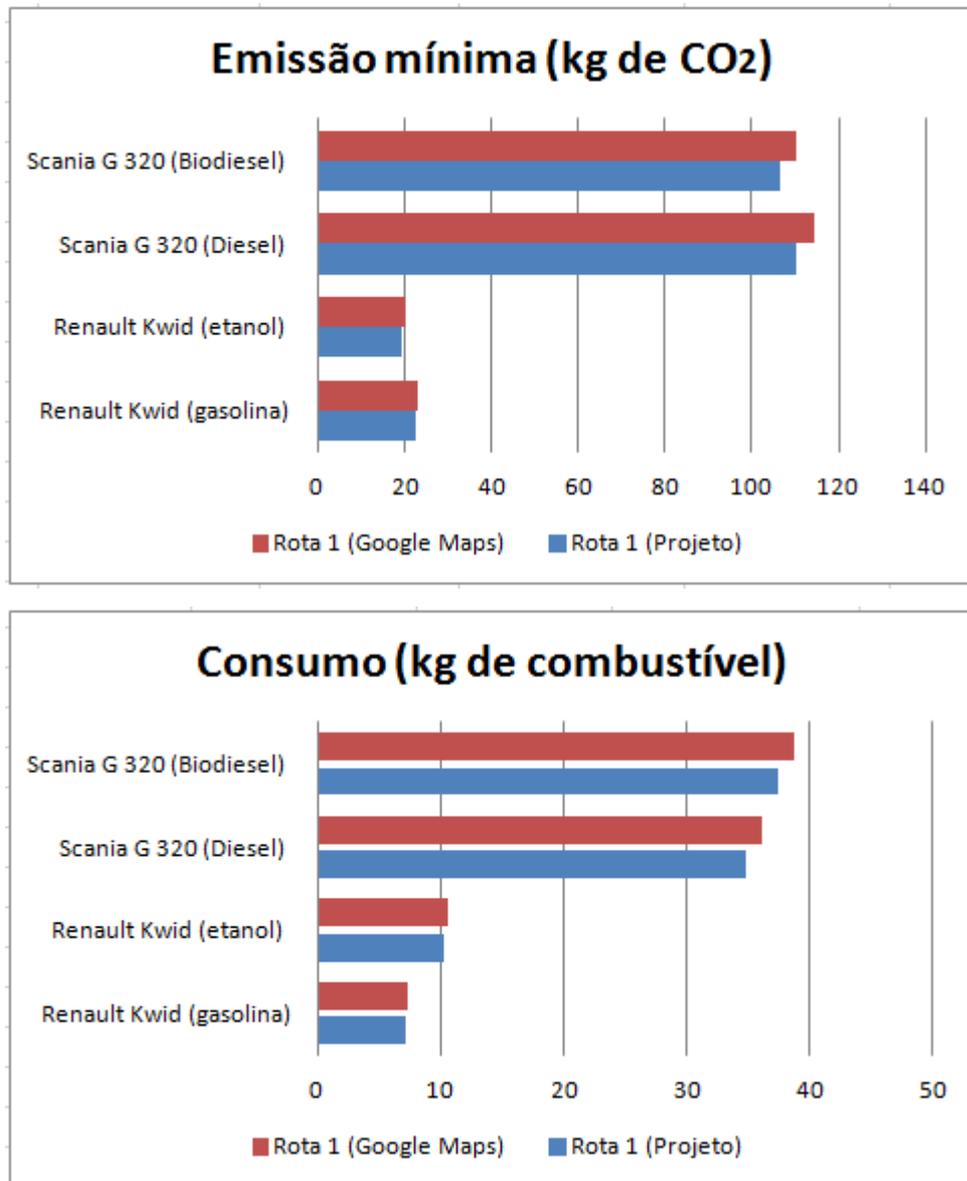


FONTE: GOOGLE MAPS; QGIS (2022)

O tempo de trajeto para a rota do Google Maps foi de 65 min e a distância foi de 86 km, já para a rota do modelo proposto o tempo foi de 76 min e a distância de trajeto foi de 89,9 km.

As duas rotas se diferenciam na região de Maringá, o Google Maps por priorizar o trajeto mais rápido e o modelo proposto por preferir a rota com menor emissão de  $CO_2$ , como é mostrado no GRÁFICO 1.

GRÁFICO 1 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE  $CO_2$  GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 1)



FONTE: O autor (2022)

Comparando os dois roteirizadores, o modelo proposto apresenta aproximadamente 3,5% menos emissão de  $CO_2$  e consumo de combustível que a do Google Maps. Nota-se que mesmo a distância e o tempo sendo maior, o modelo proposto têm uma melhor economia de combustível, além de fazer com que a geração de  $CO_2$  também seja menor, devido a velocidade em certos pontos do trajeto (modelo proposto) serem menores do que a do Google Maps, o que acarreta em menor rotação e potência do motor, reduzindo a emissão de  $CO_2$ .

A utilização de etanol obteve aproximadamente 13% menos emissão de  $CO_2$  em comparação com a gasolina, o que mostra a importância na utilização de combustíveis mais limpos visando à redução da emissão de gases poluentes. Se por exemplo, o consumo tivesse sido igual para estes combustíveis, a emissão de  $CO_2$  para o etanol seria muito menor como mostrado a seguir nas equações 43 a 45:

$$10,20759 \text{ kg de combustível} \frac{\quad}{\quad} 19,49651 \text{ kg de } CO_2 \quad (43)$$

$$7,06819 \text{ kg de combustível} \frac{\quad}{\quad} X \quad (44)$$

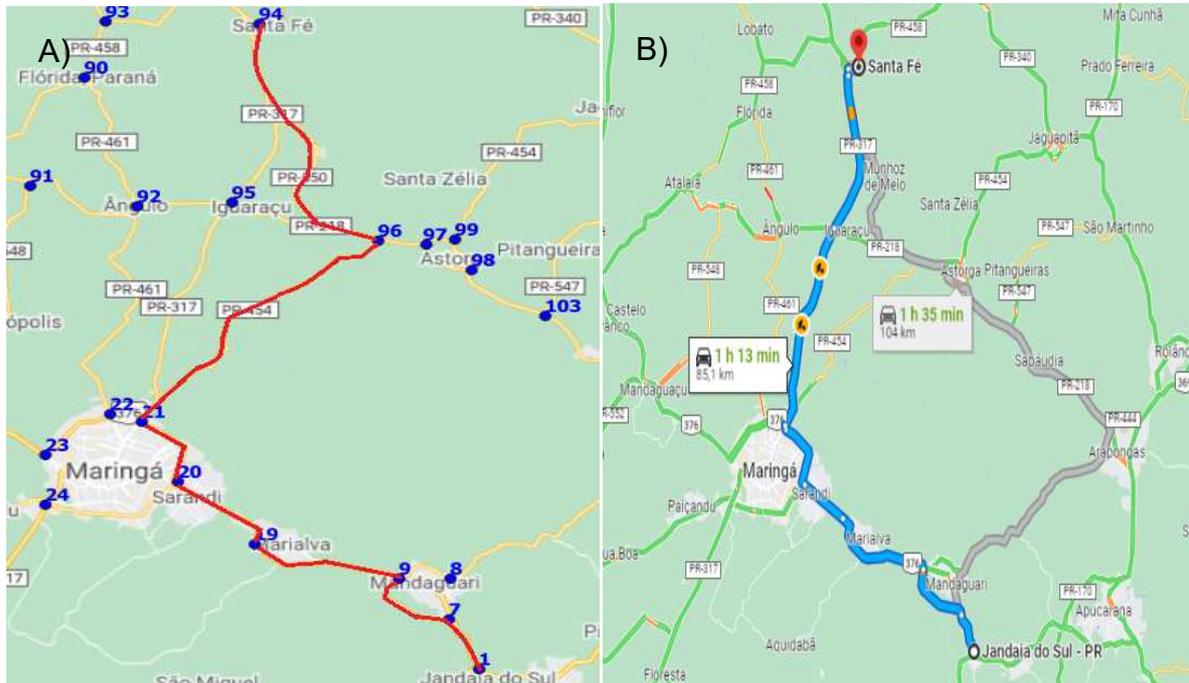
$$X = 13,50025 \text{ kg de } CO_2 \quad (45)$$

Deste modo, a emissão de  $CO_2$  para o etanol seria aproximadamente 42% menor em comparação com a gasolina. Já o biodiesel obteve cerca de 3,6% menos emissão de  $CO_2$  que o diesel, se por exemplo, o consumo fosse igual para os dois combustíveis, o biodiesel emitiria cerca de 10% menos  $CO_2$  que o diesel.

### 5.1.2 Rota 2

A FIGURA 13 mostra a rota gerada pelo modelo proposto que vai da origem (vértice 1) cidade de Jandaia do Sul até o destino (vértice 94) cidade de Santa Fé.

FIGURA 13 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ SANTA FÉ; B) ROTA DO GOOGLE MAPS

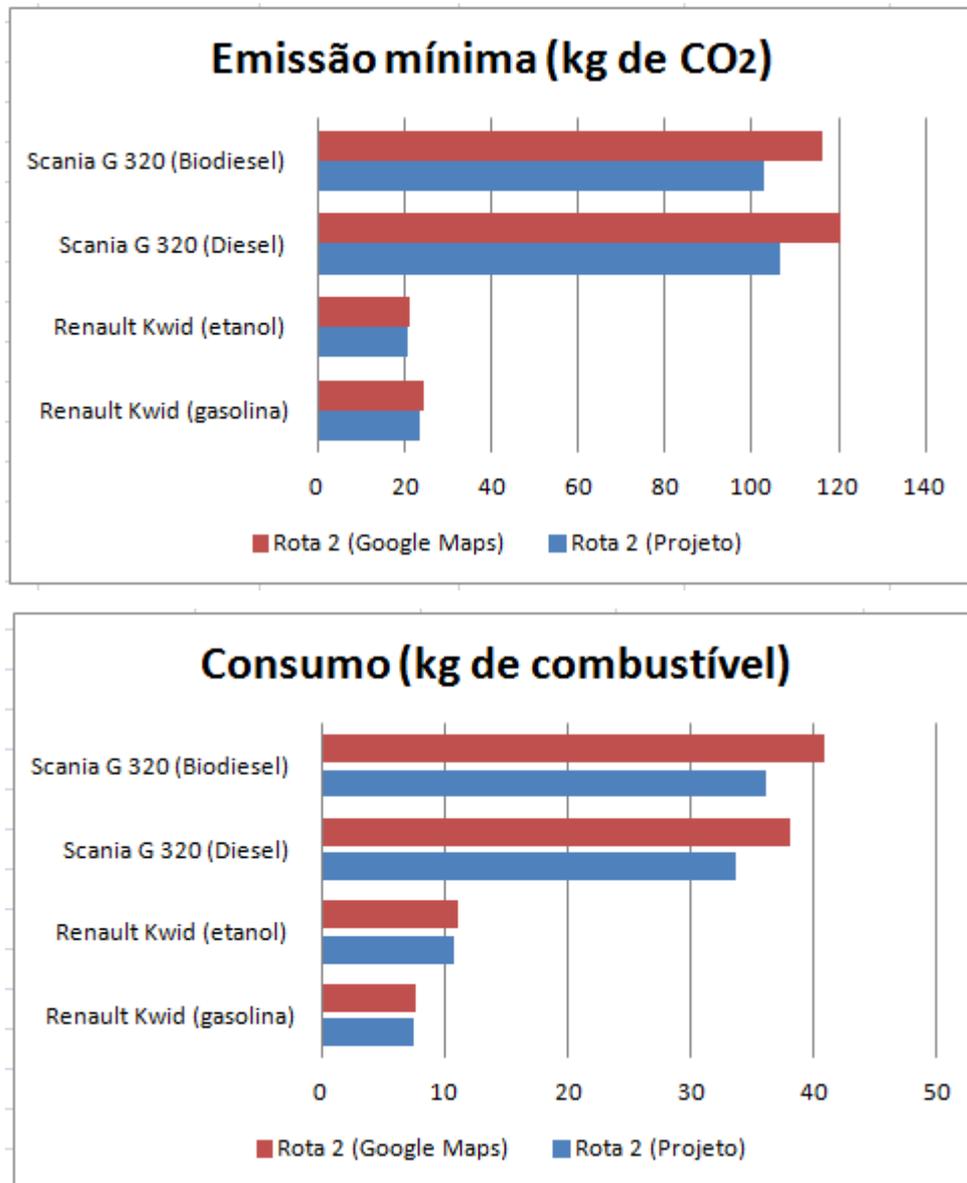


FONTE: GOOGLE MAPS, QGIS (2022)

O tempo de trajeto para a rota do Google Maps foi de 73 min e a distância foi de 85,1 km, já para a rota do modelo proposto o tempo foi de 89 min e a distância de trajeto foi de 99,7 km.

As rotas se diferenciam pelos vértices 95 e 96, sendo que a rota desse projeto passa pelo vértice 96, enquanto o Google Maps passa pelo vértice 95. A diferença entre tais rotas em termos de emissão de  $CO_2$  e consumo de combustível é mostrada no GRÁFICO 2. A rota do Google Maps é apresentada pela linha azul (trajeto mais rápido), enquanto a cinza é uma rota alternativa.

GRÁFICO 2 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE  $CO_2$  GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 2)



FONTE: O autor (2022)

Comparando os dois roteirizadores, o modelo proposto para o veículo leve apresenta aproximadamente 3,0% menos emissão de  $CO_2$  e consumo de combustível do que o Google Maps. Enquanto para o veículo pesado o modelo apresenta 11,5% menos emissão de  $CO_2$  e consumo de combustível do que o Google Maps. A velocidade menor que acarreta em menos rotação e potência do motor nos vértice que se diferenciaram entre as rotas, foi eficaz para redução do consumo de combustível e emissão de  $CO_2$ , principalmente para o veículo pesado,

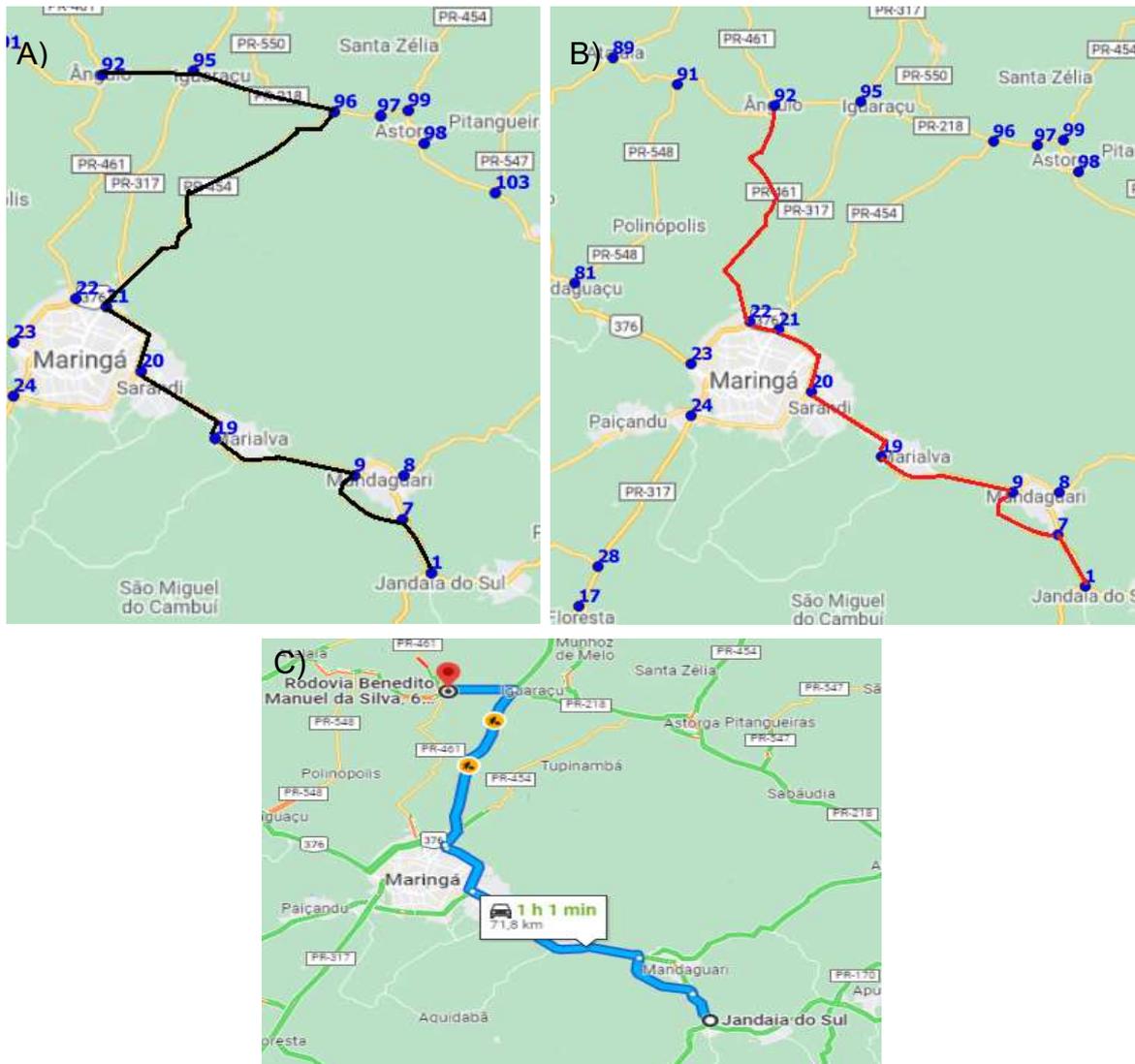
devido ao maior peso, qualquer redução de potência exigida pelo motor resultará em menor consumo do que para o veículo leve.

A diferença de emissão entre os combustíveis foi à mesma que a rota 1, sendo aproximadamente 13% menor a emissão utilizando etanol em comparação com a gasolina e 3,6% menor o uso do biodiesel do que o diesel.

### 5.1.3 Rota 3

A FIGURA 14 mostra a rota gerada pelo modelo proposto que vai da origem (vértice 1) cidade de Jandaia do Sul até o destino (vértice 92) cidade de Ângulo.

FIGURA 14 – ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ ÂNGULO PARA A) VEÍCULO PESADO E B) VEÍCULO LEVE ; C) ROTA DO GOOGLE MAPS

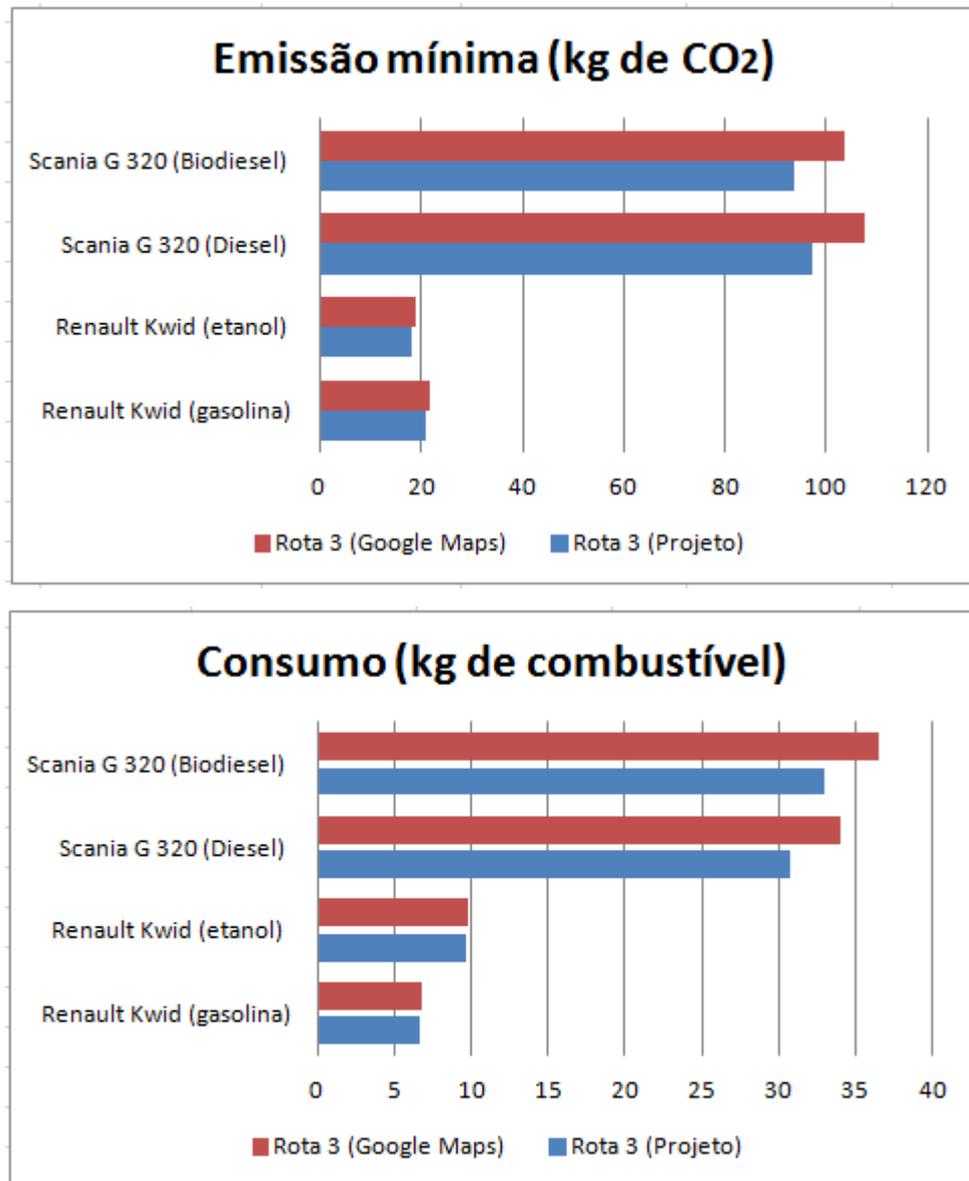


FONTE: GOOGLE MAPS, QGIS (2022)

O tempo de trajeto para a rota do Google Maps foi de 61 min e a distância foi de 71,8 km, já para as rotas do modelo proposto o tempo foi de 117 min e a distância de trajeto foi de 74,2 km para o veículo leve, já para o veículo pesado o tempo foi de 82 min e a distância foi de 90,3 km.

Os veículos utilizados tiveram rotas diferentes, o veículo leve passando pelo vértice 22 e o pesado pelos vértices 95 e 96, essa diferença se deve pelo tempo de trajeto para o veículo pesado ser menor do que para o veículo leve, ou seja, quanto menor a velocidade de viagem mais eficiente será a economia de combustível e emissão de  $CO_2$ . A rota do Google Maps foi diferente das outras duas rotas por priorizar o caminho mais rápido, o que exige mais do motor dos veículos devido esse trajeto exigir maior velocidade dos veículos, essa diferença em valores numéricos é mostrada no GRÁFICO 3.

GRÁFICO 3 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE  $CO_2$  GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 3)



FONTE: O autor (2022)

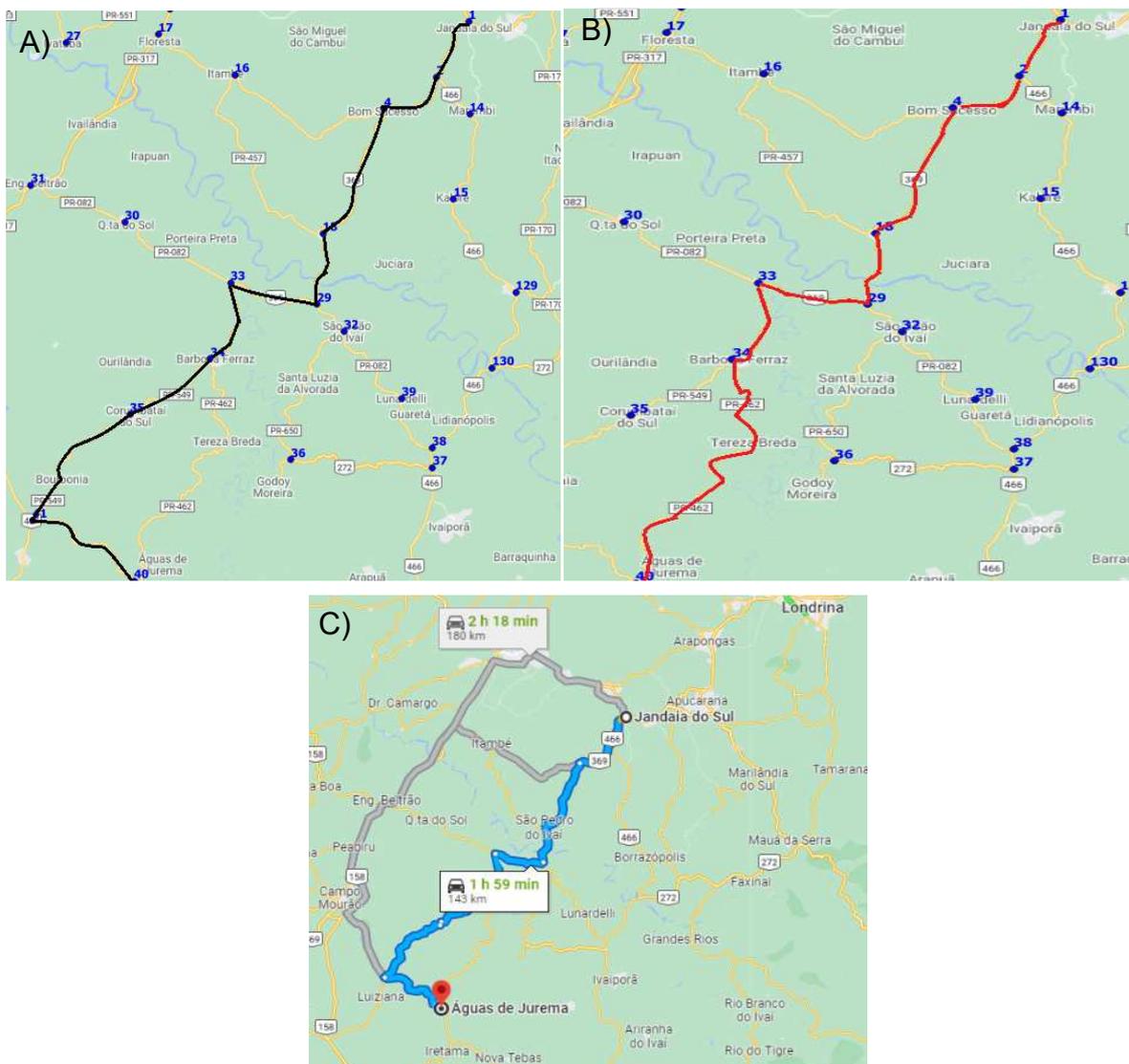
O modelo proposto para o veículo leve apresenta aproximadamente 2,5% menos emissão de  $CO_2$  e consumo de combustível que a do Google Maps. Enquanto para o veículo pesado o modelo apresenta 9,6% menos emissão de  $CO_2$  e consumo de combustível que a do Google Maps.

A diferença de emissão entre os combustíveis foi à mesma que a rota 1 e 2, sendo aproximadamente 13% menor a emissão utilizando etanol em comparação com a gasolina e 3,6% menor o uso do biodiesel do que o diesel.

### 5.1.4 Rota 4

A FIGURA 15 mostra a rota gerada pelo modelo proposto que vai da origem (vértice 1) cidade de Jandaia do Sul até o destino (vértice 40) região da cidade de Iretama.

FIGURA 15 – ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ A REGIÃO DE IRETAMA PARA A) VEÍCULO PESADO E B) VEÍCULO LEVE; C) ROTA DO GOOGLE MAPS



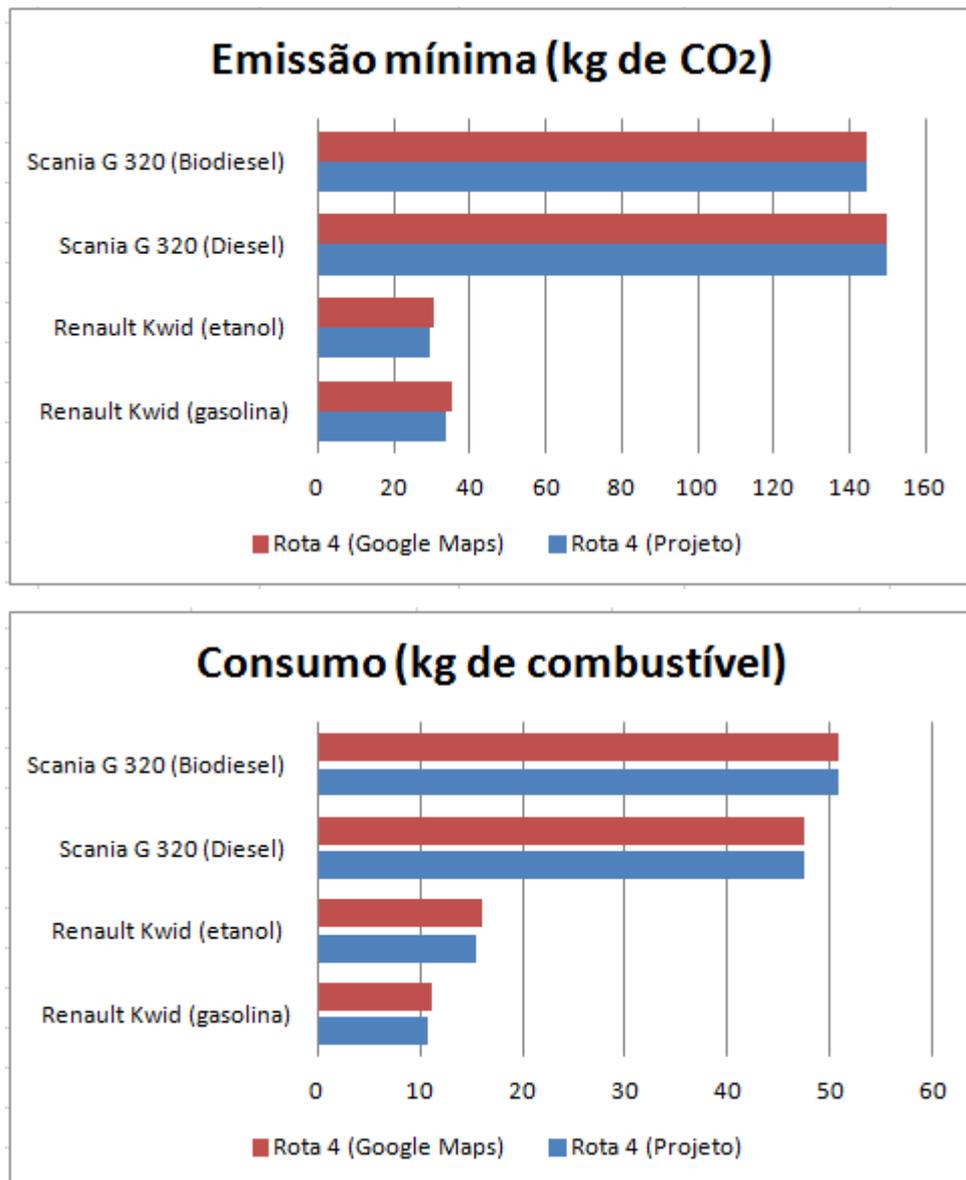
FONTE: GOOGLE MAPS, QGIS (2022)

O tempo de trajeto para a rota do Google Maps foi de 119 min e a distância foi de 143 km, já para as rotas do modelo proposto o tempo foi de 144 min e a

distância de trajeto foi de 135,2 km para o veículo leve, já para o veículo pesado o tempo foi de 119 min e a distância foi de 143 km.

Os veículos utilizados tiveram rotas diferentes, o veículo pesado passando por dois vértices a mais que o veículo leve e sua rota sendo igual a do Google Maps (linha azul), ou seja, varias rotas do Google Maps serão iguais ao modelo desse projeto, onde o trajeto mais rápido será o mesmo de menor consumo. Os valores de emissão de  $CO_2$  e consumo de combustível são mostrados no GRÁFICO 4.

GRÁFICO 4 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE  $CO_2$  GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 4)



FONTE: O autor (2022)

O modelo proposto para o veículo leve apresenta aproximadamente 4% menos emissão de  $CO_2$  e consumo de combustível que o Google Maps. Enquanto para o veículo pesado o modelo apresenta a mesma emissão de  $CO_2$  e consumo de combustível que o Google Maps.

## 5.2 ROTAS ELEVADAS

Os vértices que apresentam valores de elevação ao nível do mar diferentes serão chamados de “rotas elevadas”, sendo:

O vértice origem a cidade de Jandaia do Sul;

A rota 1 o vértice destino é a cidade de Tuneiras do Oeste;

A rota 2 o vértice destino é a cidade de Mamborê;

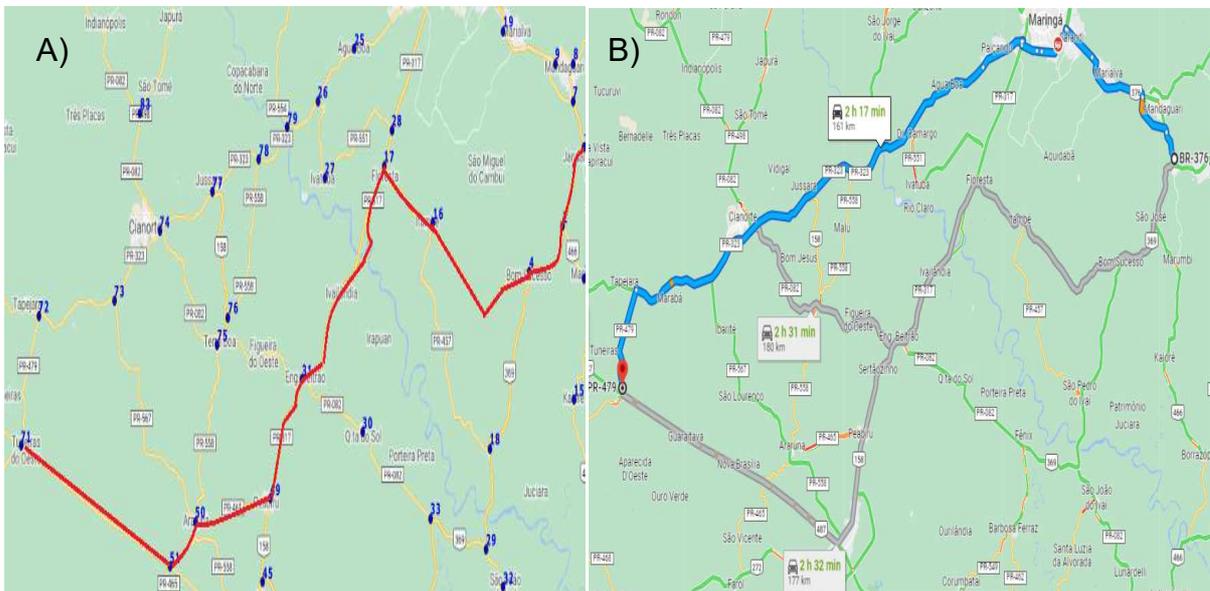
A rota 3 o vértice destino é a cidade de Florestópolis;

A rota 4 o vértice destino é a cidade de Centenário do Sul.

### 5.2.1 Rota 1

A FIGURA 16 mostra a rota gerada pelo modelo proposto que vai da origem (vértice 1) cidade de Jandaia do Sul até o destino (vértice 71) cidade de Tuneiras do Oeste.

FIGURA 16 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL HÁ TUNEIRAS DO OESTE; B) ROTAS DO GOOGLE MAPS SENDO A LINHA CINZA COM UM TEMPO DE VIAGEM DE 2h E 32 min A ROTA ALTERNATIVA



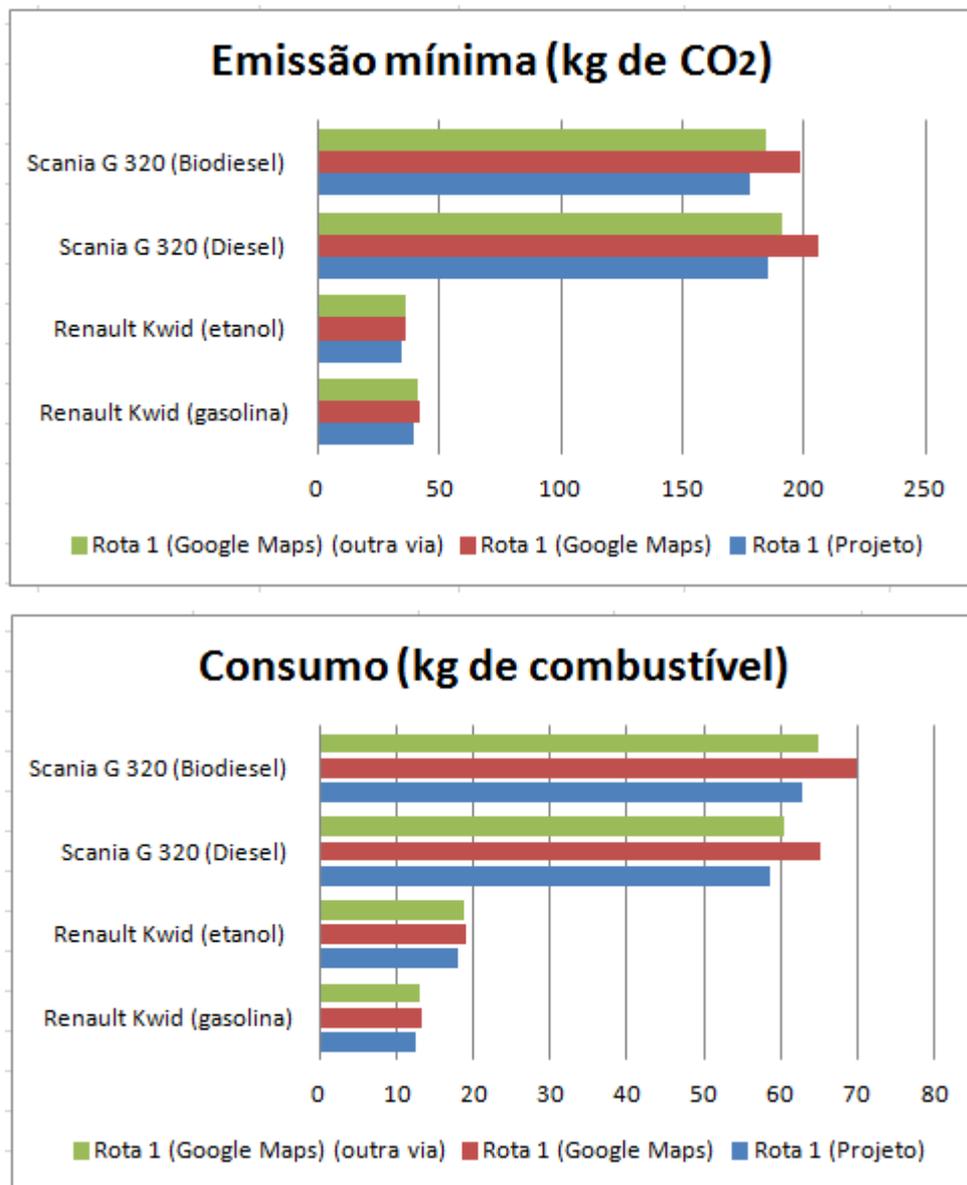
FONTE: GOOGLE MAPS, QGIS (2022)

O tempo de trajeto para a rota do Google Maps foi de 137 min e a distância foi de 166 km, já para a rota do modelo proposto o tempo foi de 139 min e a distância de trajeto foi de 161,3 km, e para a rota alternativa do Google Maps o tempo foi de 152 min e a distância foi de 177 km.

Comparando os dois roteirizadores, o modelo proposto busca uma rota que visa elevações das vias similares, ou seja, exige menos do motor do veículo, por isso a diferença com o Google Maps, onde sua rota teve elevações das vias maiores, o que gerou rotas totalmente diferentes em comparação com as “rotas planas”, onde as elevações das vias eram bem mais similares.

O GRÁFICO 5 mostra os resultados das emissões e consumo de combustível para tais rotas, acrescentando também a rota alternativa do Google Maps de 177 km de distância, que foi quase a mesma rota do modelo proposto.

GRÁFICO 5 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE  $CO_2$  GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 1)



FONTE: O autor (2022)

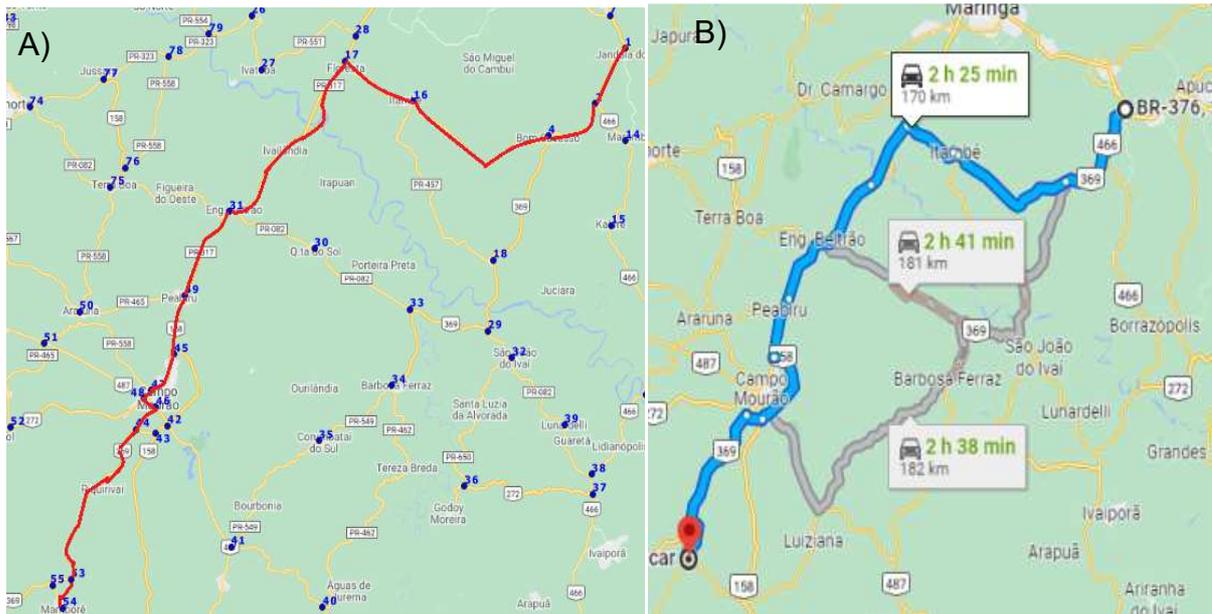
A redução das emissões de  $CO_2$  e consumo de combustível foi de aproximadamente 4,75% menor para o modelo proposto em comparação ao Google Maps na utilização do veículo leve, já para o pesado a redução foi de cerca de 10%. Comparando o modelo proposto com a rota alternativa do Google Maps a redução foi de aproximadamente 3,9% para o veículo leve e 3,3% para o pesado.

A rota alternativa obteve menor diferença de emissão de  $CO_2$  e consumo de combustível comparado ao modelo proposto.

### 5.2.2 Rota 2

A FIGURA 17 mostra a rota gerada pelo modelo proposto que vai da origem (vértice 1) cidade de Jandaia do Sul até o destino (vértice 54) cidade de Mamborê.

FIGURA 17 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ MAMBORÊ; B) ROTA DO GOOGLE MAPS

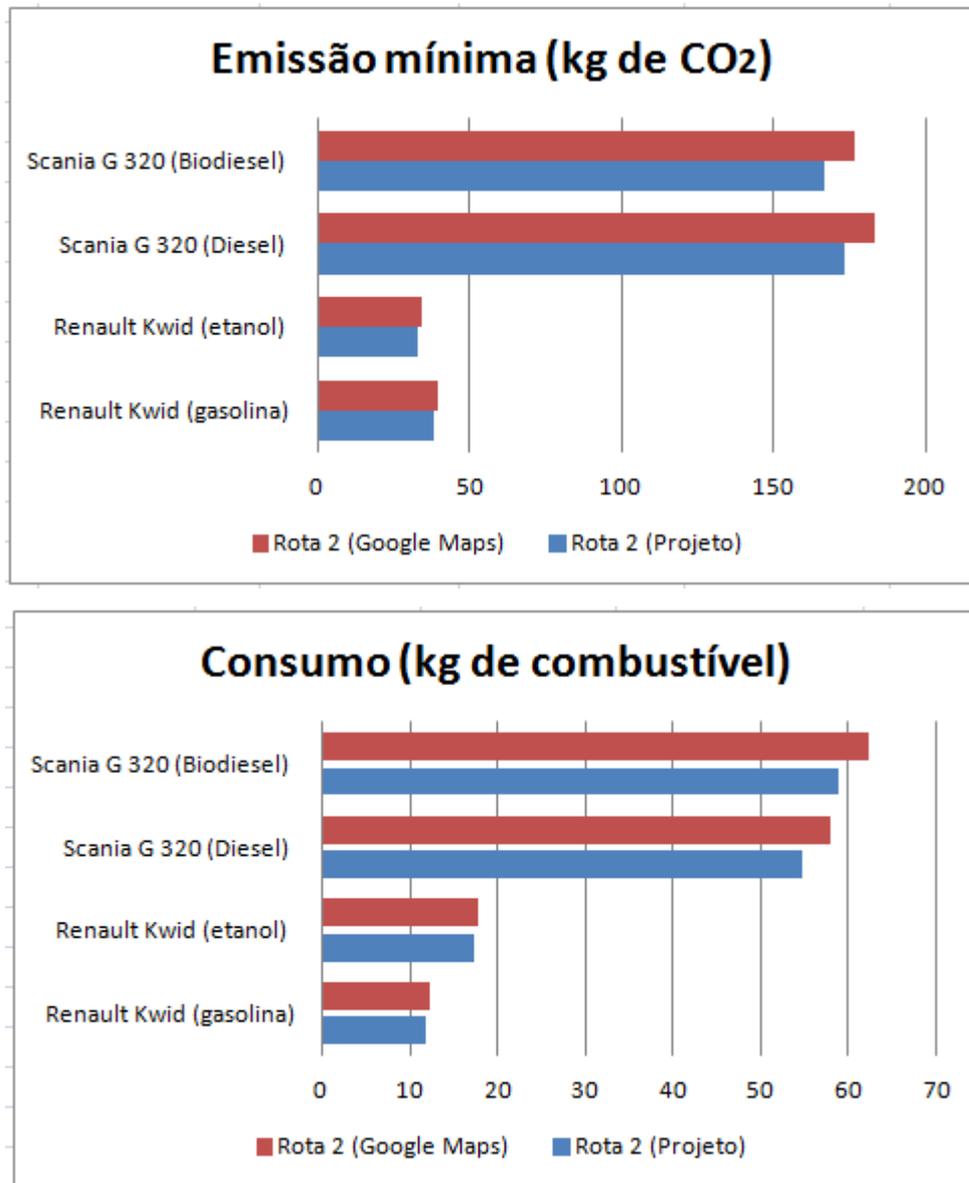


FONTE: GOOGLE MAPS, QGIS (2022)

O tempo de trajeto para a rota do Google Maps foi de 129 min e a distância foi de 170 km, já para a rota do modelo proposto o tempo foi de 133 min e a distância de trajeto foi de 155,1 km.

Comparando os dois roteirizadores, as rotas se diferenciam na cidade de Campo Mourão, onde o modelo proposto passa pelos vértices 47, 48 e 46, ou seja, por dentro da cidade, já o Google Maps passando por fora da cidade, nos vértices 42 e 43. Os resultados das emissões de  $CO_2$  e consumo de combustível são mostrados no GRÁFICO 6.

GRÁFICO 6 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE  $CO_2$  GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 2)



FONTE: O autor (2022)

Utilizando o veículo leve, a redução das emissões de  $CO_2$  e consumo de combustível foi de aproximadamente 4% menor para o modelo do projeto em comparação com o Google Maps. Já para o veículo pesado, a redução foi de cerca de 5,5%. Para esta rota, a distância para o Google Maps foi maior do que para o modelo proposto, mesmo assim a velocidade média do modelo desse trabalho foi menor além das vias utilizadas pelo Google Maps serem mais elevadas (declive das vias).

### 5.2.3 Rota 3

A FIGURA 18 mostra a rota gerada pelo modelo proposto que vai da origem (vértice 1) cidade de Jandaia do Sul até o destino (vértice 111) cidade de Florestópolis.

FIGURA 18 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ FLORESTÓPOLIS; B) ROTA DO GOOGLE MAPS

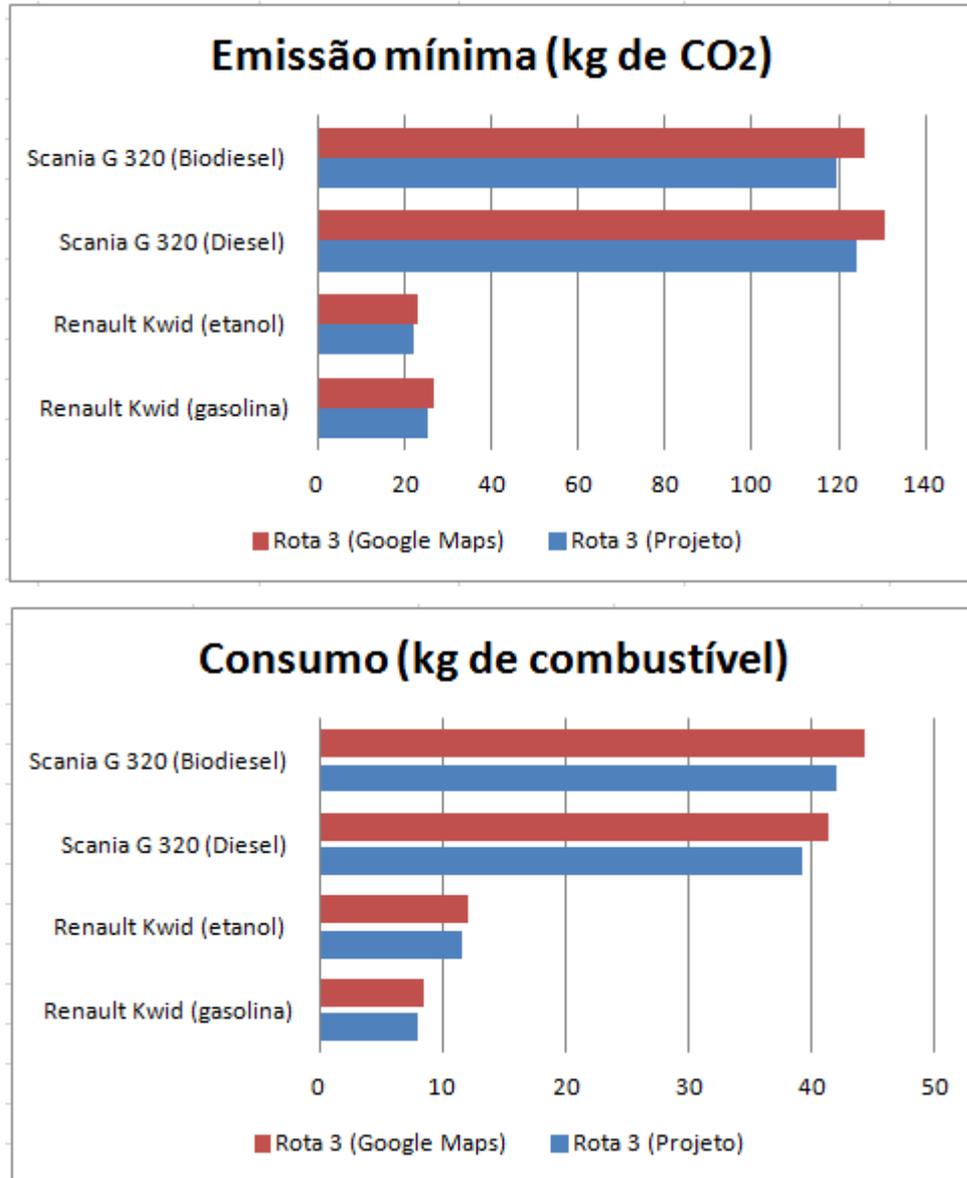


FONTE: GOOGLE MAPS, QGIS (2022)

O tempo de trajeto para a rota do Google Maps foi de 95 min e a distância foi de 106 km, já para a rota do modelo proposto o tempo foi de 100 min e a distância de trajeto foi de 101,3 km.

Comparando os dois roteirizadores, as rotas se diferenciam por o modelo proposto passar pela cidade de Apucarana e o Google Maps pela cidade de Mandaguari, onde o modelo proposto optou por seguir uma elevação similar a cidade do vértice de origem. O GRÁFICO 7 mostra os resultados das emissões de  $CO_2$  e consumo de combustível para essa rota.

GRÁFICO 7 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE  $CO_2$  GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 3)



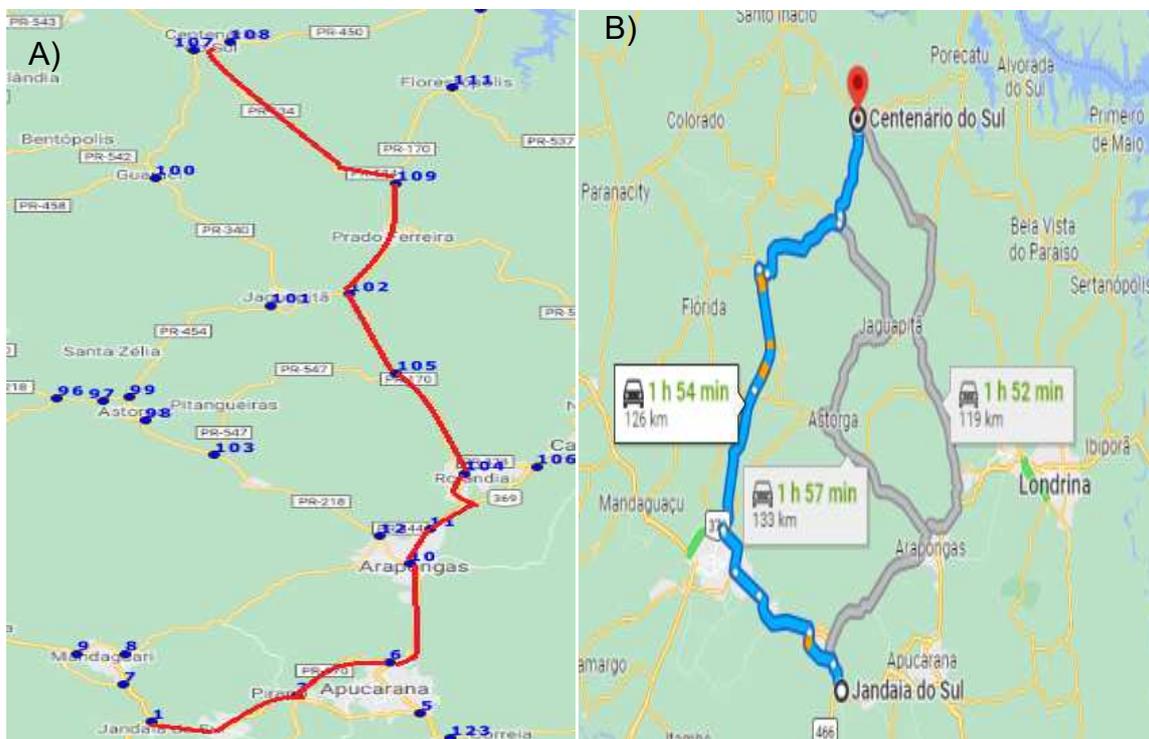
FONTE: O autor (2022)

O modelo desse trabalho apresentou aproximadamente 5% menos emissões de  $CO_2$  e consumo de combustível em comparação ao Google Maps, tanto para o veículo leve quanto para o pesado. Deste modo, tanto as “rotas elevadas” quanto as “rotas planas” apresentam redução das emissões de aproximadamente 13% utilizando etanol em comparação com a gasolina e redução de 3,6% utilizando biodiesel em comparação com o diesel.

#### 5.2.4 Rota 4

A FIGURA 19 mostra a rota gerada pelo modelo proposto que vai da origem (vértice 1) cidade de Jandaia do Sul até o destino (vértice 107) cidade de Centenário do Sul.

FIGURA 19 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL HÁ CENTENÁRIO DO SUL; B) ROTA DO GOOGLE MAPS



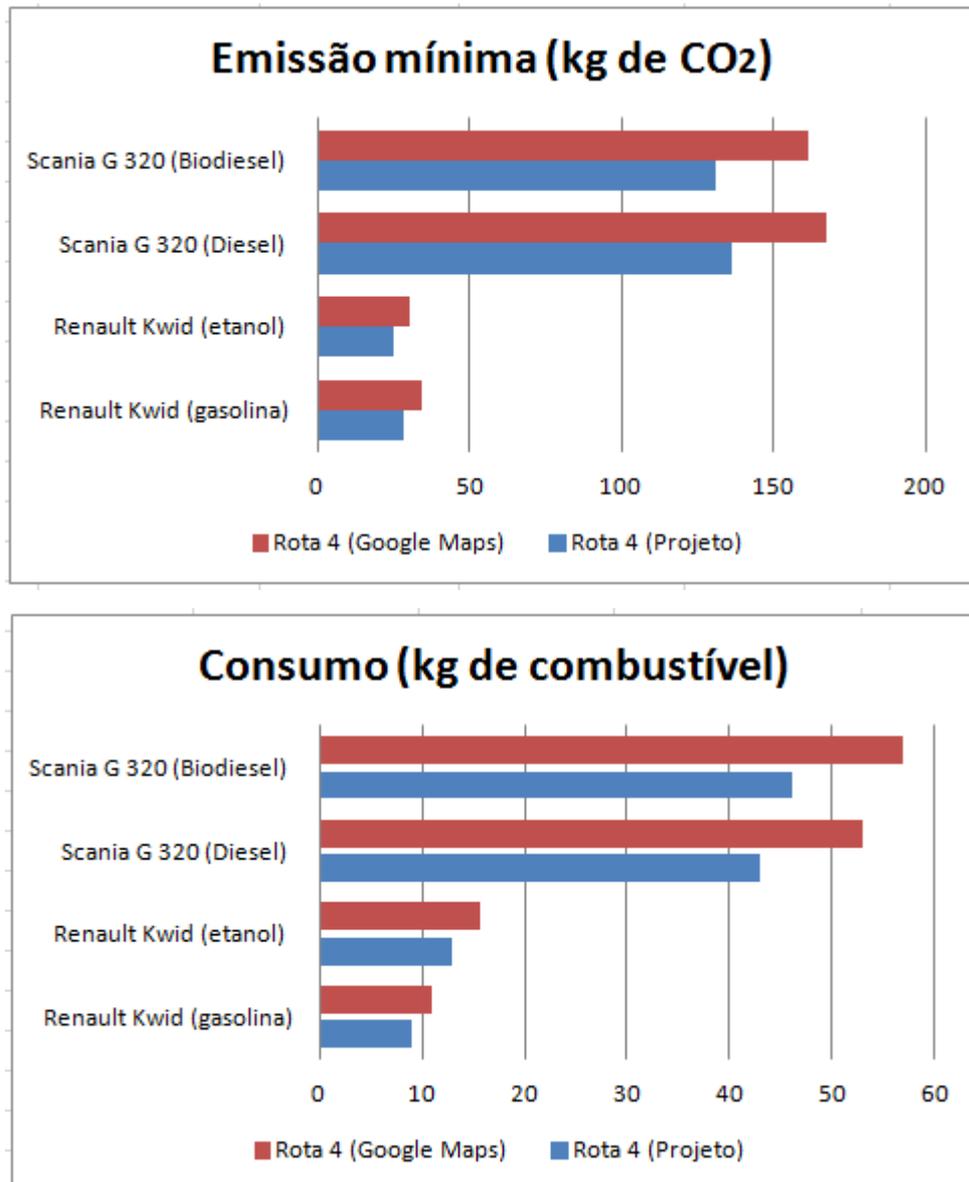
FONTE: GOOGLE MAPS, QGIS (2022)

O tempo de trajeto para a rota do Google Maps foi de 114 min e a distância foi de 126 km, já para a rota do modelo proposto o tempo foi de 116 min e a distância de trajeto foi de 115,6 km.

As rotas para os dois roteirizadores se diferenciam completamente, o modelo proposto passando pelas cidades de Apucarana, Arapongas e Rolândia e o Google Maps pelas cidades de Mandaguari e Maringá, onde o modelo proposto optou por seguir uma elevação similar entre os vértices e o Google Maps o trajeto

mais rápido. O GRÁFICO 8 mostra os resultados das emissões de  $CO_2$  e consumo de combustível para essa rota.

GRÁFICO 8 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE  $CO_2$  GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 4)



FONTE: O autor (2022)

Como os dois roteirizadores geraram rotas muito diferentes para esse vértice destino, a redução das emissões de  $CO_2$  e consumo de combustível foram para o veículo leve aproximadamente 17% menor utilizando o modelo proposto em comparação ao Google Maps, e para o veículo pesado a redução foi de cerca de 19%. Essa grande diferença gerada nesse vértice destino mostra que o modelo

proposto pode gerar rotas que garantam uma boa economia de combustível além de minimizar o impacto ambiental causado pela queima de combustíveis em veículos automotores.

### 5.3 ROTAS MISTAS

Os vértices que apresentam valores de elevação ao nível do mar similares em parte da rota, sendo que a outra parte tem-se elevações diferentes, essas rotas serão chamadas de “rotas mistas”, sendo:

O vértice origem a cidade de Jandaia do Sul;

A rota 1 o vértice destino é a cidade de Uraí;

A rota 2 o vértice destino é a cidade de Bela Vista do Paraíso;

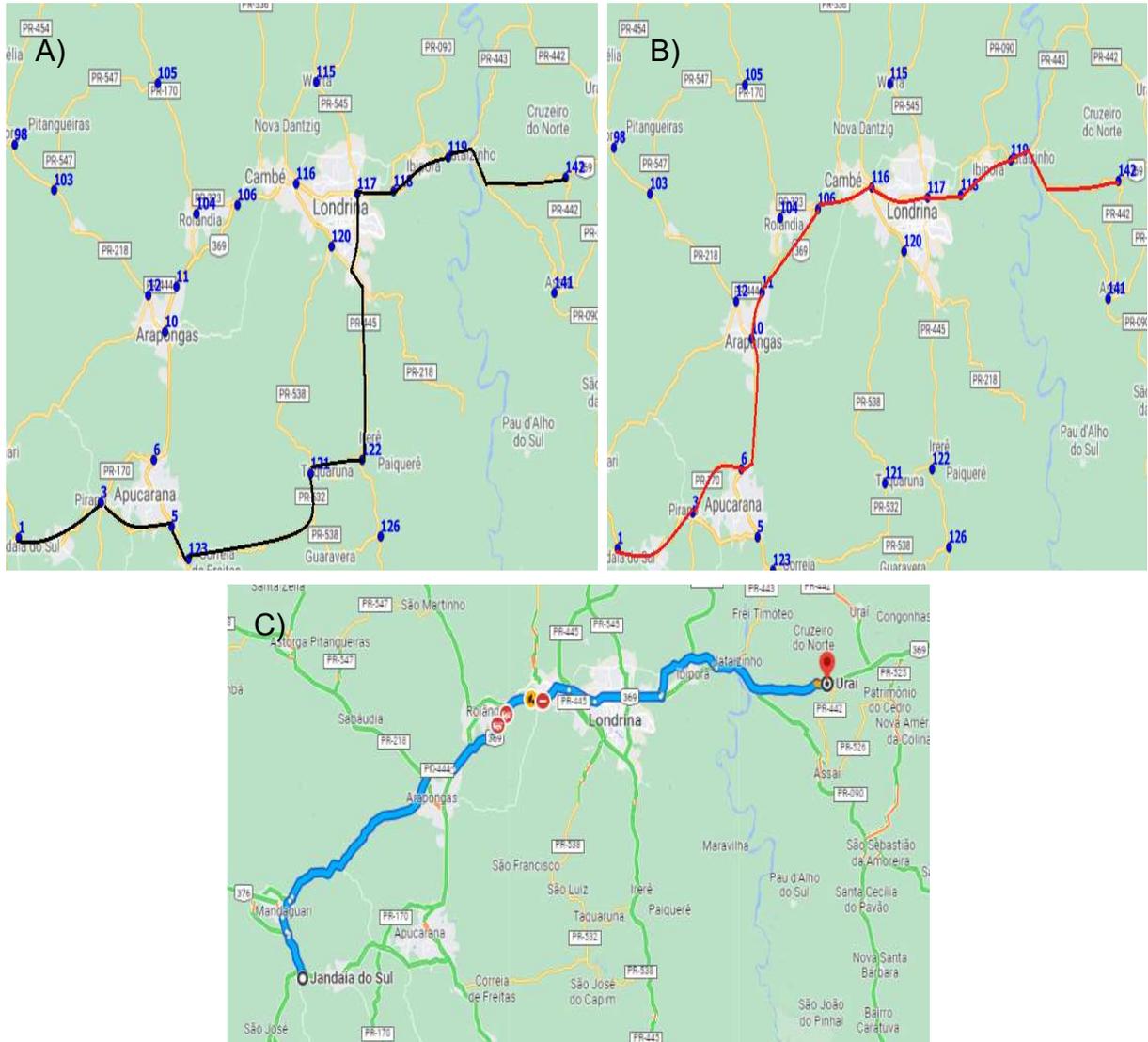
A rota 3 o vértice destino é a cidade de Manoel Ribas;

A rota 4 o vértice destino é a cidade de São Jorge do Ivaí.

#### 5.3.1 Rota 1

A FIGURA 20 mostra a rota gerada pelo modelo proposto que vai da origem (vértice 1) cidade de Jandaia do Sul até o destino (vértice 142) região da cidade de Uraí.

FIGURA 20 – ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ REGIÃO DE URAÍ PARA A) VEÍCULO PESADO E B) VEÍCULO LEVE; C) ROTA DO GOOGLE MAPS

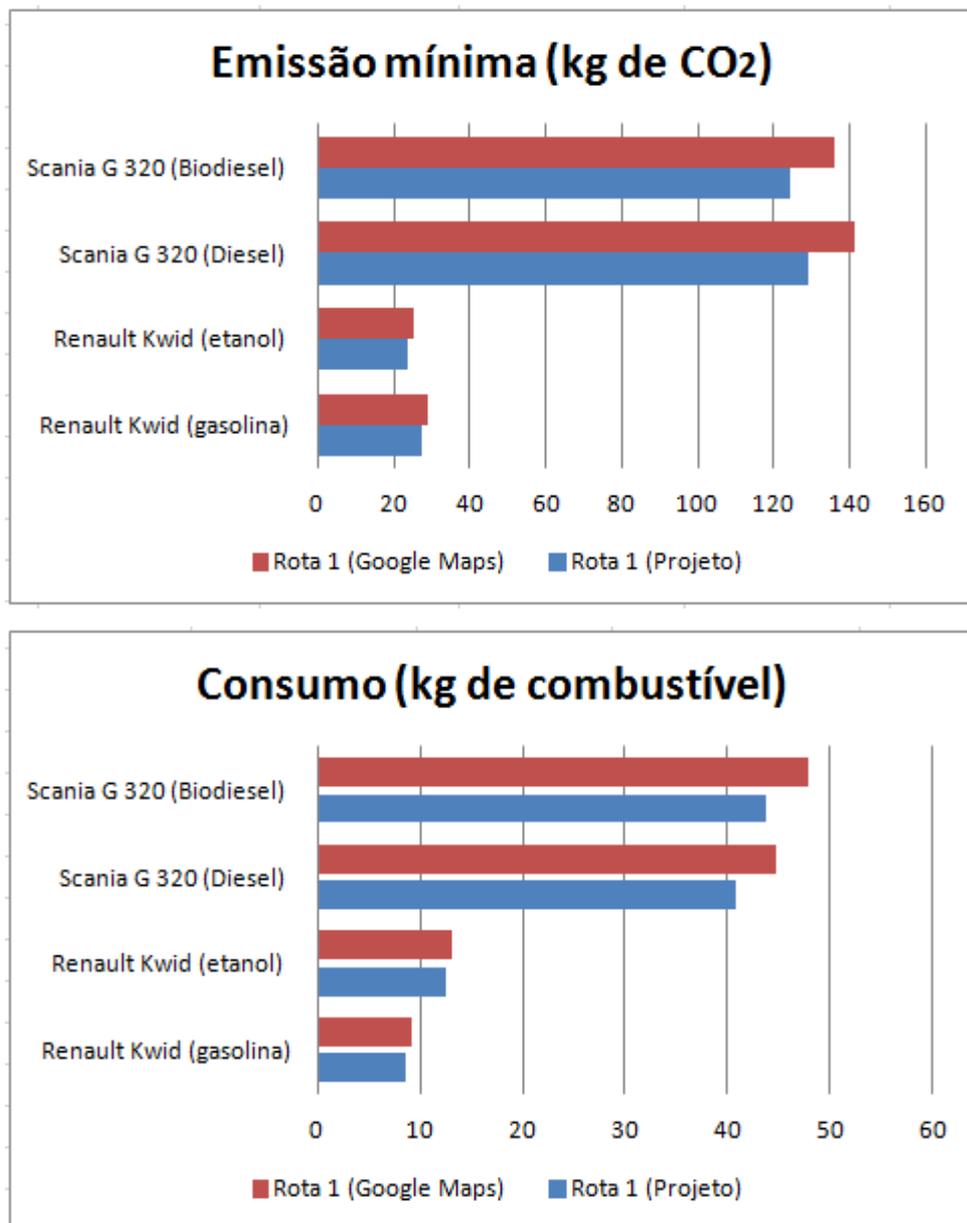


FONTE: GOOGLE MAPS, QGIS (2022)

O tempo de trajeto para a rota do Google Maps foi de 106 min e a distância foi de 115 km, já para as rotas do modelo proposto o tempo foi de 110 min e a distância de trajeto foi de 109,7 km para o veículo leve, já para o veículo pesado o tempo foi de 123 min e a distância foi de 126,2 km.

As rotas utilizando os veículos leves e pesado para este vértice destino se diferenciaram, devido à rota do veículo pesado buscar vias contendo vértices com altitudes mais similares que o veículo leve. O GRÁFICO 9 mostra os resultados das emissões de  $CO_2$  e consumo de combustível para essas rotas.

GRÁFICO 9 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE  $CO_2$  GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 1)



FONTE: O autor (2022)

Comparando os dois roteirizadores, o modelo proposto apresenta utilizando o veículo leve cerca de 5% menos emissões de  $CO_2$  e consumo de combustível que o Google Maps, já o veículo pesado apresenta redução de aproximadamente 8,5% em comparação com o Google Maps. Diferente das “rotas planas”, as “rotas elevadas” e as “rotas mistas” apresentam rotas que minimizam as emissões de  $CO_2$  devido não somente a menor velocidade em comparação ao Google Maps, mas

também por priorizar vias com menos desníveis, ou seja, quanto menor forem os descolamentos melhor será a redução das emissões.

### 5.3.2 Rota 2

A FIGURA 21 mostra a rota gerada pelo modelo proposto que vai da origem (vértice 1) cidade de Jandaia do Sul até o destino (vértice 113) cidade de Bela Vista do Paraíso.

FIGURA 21 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ BELA VISTA DO PARAÍSO; B) ROTA DO GOOGLE MAPS

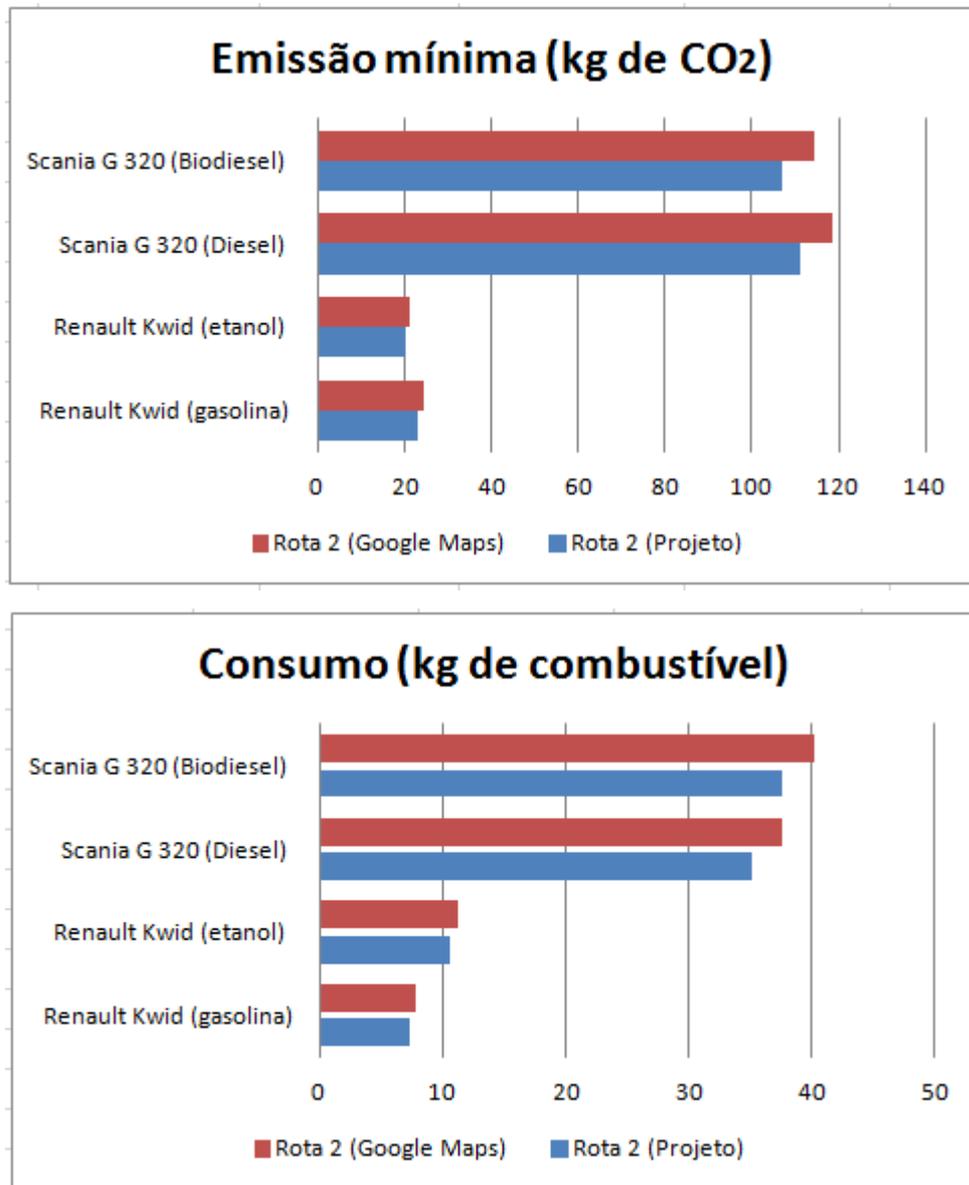


FONTE: GOOGLE MAPS, QGIS (2022)

O tempo de trajeto para a rota do Google Maps foi de 81 min e a distância foi de 101 km, já para a rota do modelo proposto o tempo foi de 84 min e a distância de trajeto foi de 93,6 km.

Comparando os dois roteirizadores, as rotas se diferenciam pelo modelo proposto passar pela cidade de Apucarana e o Google Maps pela cidade de Mandaguari. O GRÁFICO 10 mostra os resultados das emissões de  $CO_2$  e consumo de combustível para essas rotas.

GRÁFICO 10 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE  $CO_2$  GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 2)



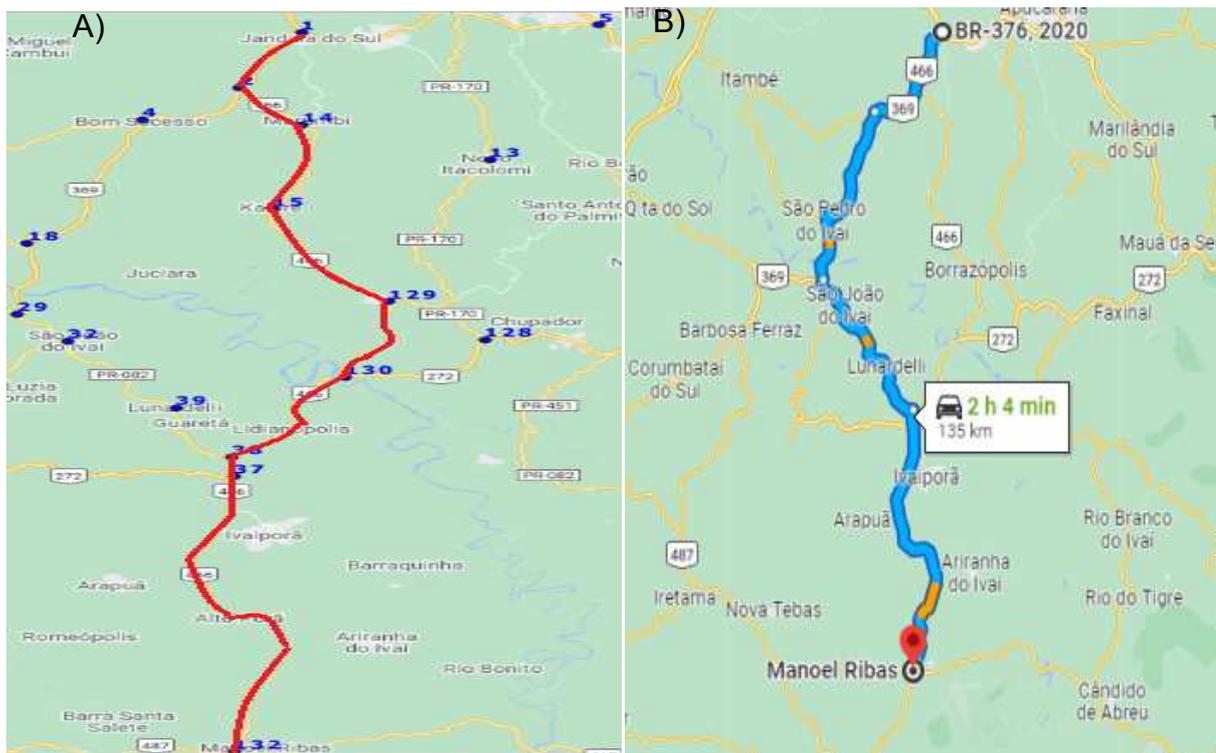
FONTE: O autor (2022)

As rotas do modelo proposto apresentam redução das emissões de  $CO_2$  e consumo de combustível em comparação ao Google Maps de aproximadamente 6% para o veículo leve e 6,5% para o pesado. Essa rota mostra que além reduzir as emissões de  $CO_2$  e garantir economia de combustível, o modelo proposto também pode gerar rotas com menor distância de trajeto.

### 5.3.3 Rota 3

A FIGURA 22 mostra a rota gerada pelo modelo proposto que vai da origem (vértice 1) cidade de Jandaia do Sul até o destino (vértice 132) cidade de Manoel Ribas.

FIGURA 22 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ MANOEL RIBAS; B) ROTA DO GOOGLE MAPS

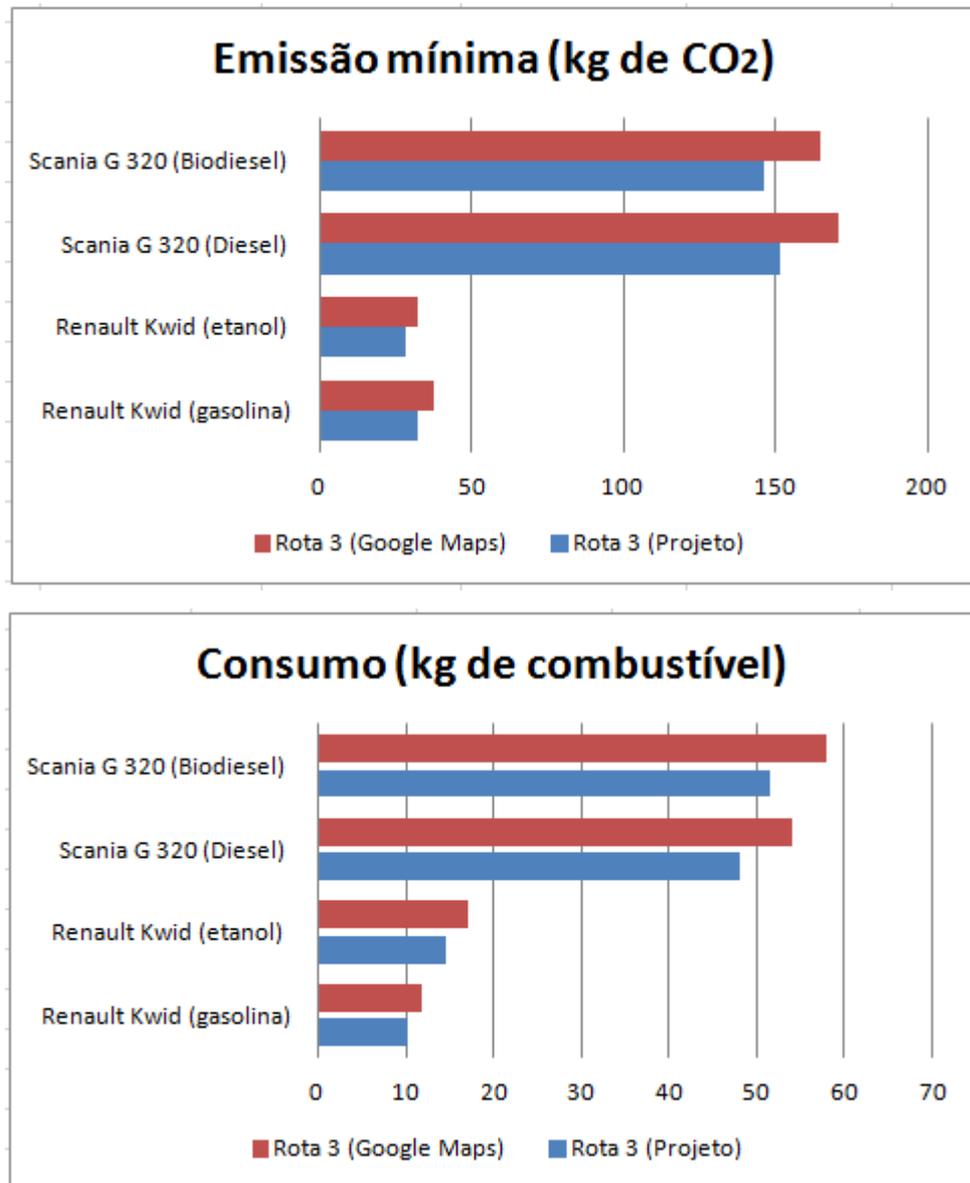


FONTE: GOOGLE MAPS, QGIS (2022)

O tempo de trajeto para a rota do Google Maps foi de 120 min e a distância foi de 135 km, já para a rota do modelo proposto o tempo foi de 122 min e a distância de trajeto foi de 130,4 km.

Comparando os dois roteirizadores, as rotas se diferenciam pelo modelo proposto passar pela cidade de Marumbi (vértice 14) e o Google Maps pela cidade de Bom Sucesso (vértice 4). O GRÁFICO 11 mostra os resultados das emissões de  $CO_2$  e consumo de combustível para essas rotas.

GRÁFICO 11 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE  $CO_2$  GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 3)



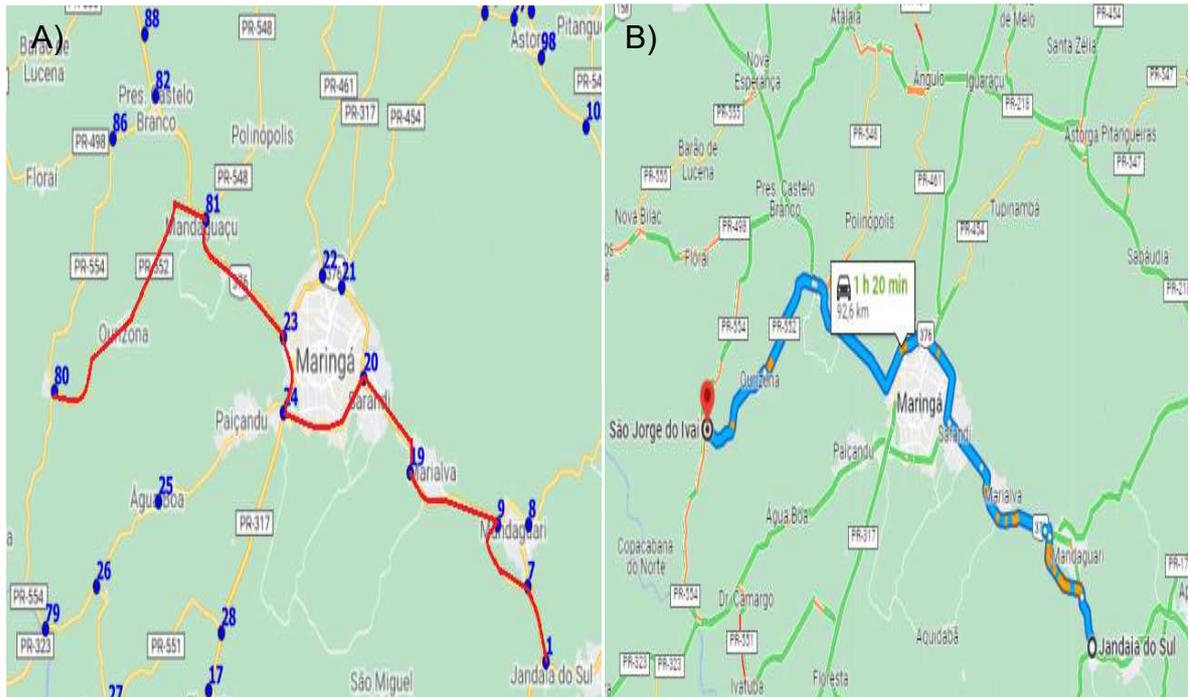
FONTE: O autor (2022)

A redução das emissões de  $CO_2$  e consumo de combustível utilizando o veículo leve foi de aproximadamente 13,7% menor para o modelo proposto em comparação ao Google Maps, já para o veículo pesado a redução foi de aproximadamente 11,2%. Esse vértice destino também apresentou grande redução das emissões e uma boa economia de combustível, devido à rota do modelo desse trabalho manter por mais vértices uma elevação similar.

### 5.3.4 Rota 4

A FIGURA 23 mostra a rota do modelo proposto que vai da origem (vértice 1) cidade de Jandaia do Sul até o destino (vértice 80) cidade de São Jorge do Ivaí.

FIGURA 23 – A) ROTA DO MODELO PROPOSTO DE JANDAIA DO SUL ATÉ SÃO JORGE DO IVAÍ; B) ROTA DO GOOGLE MAPS

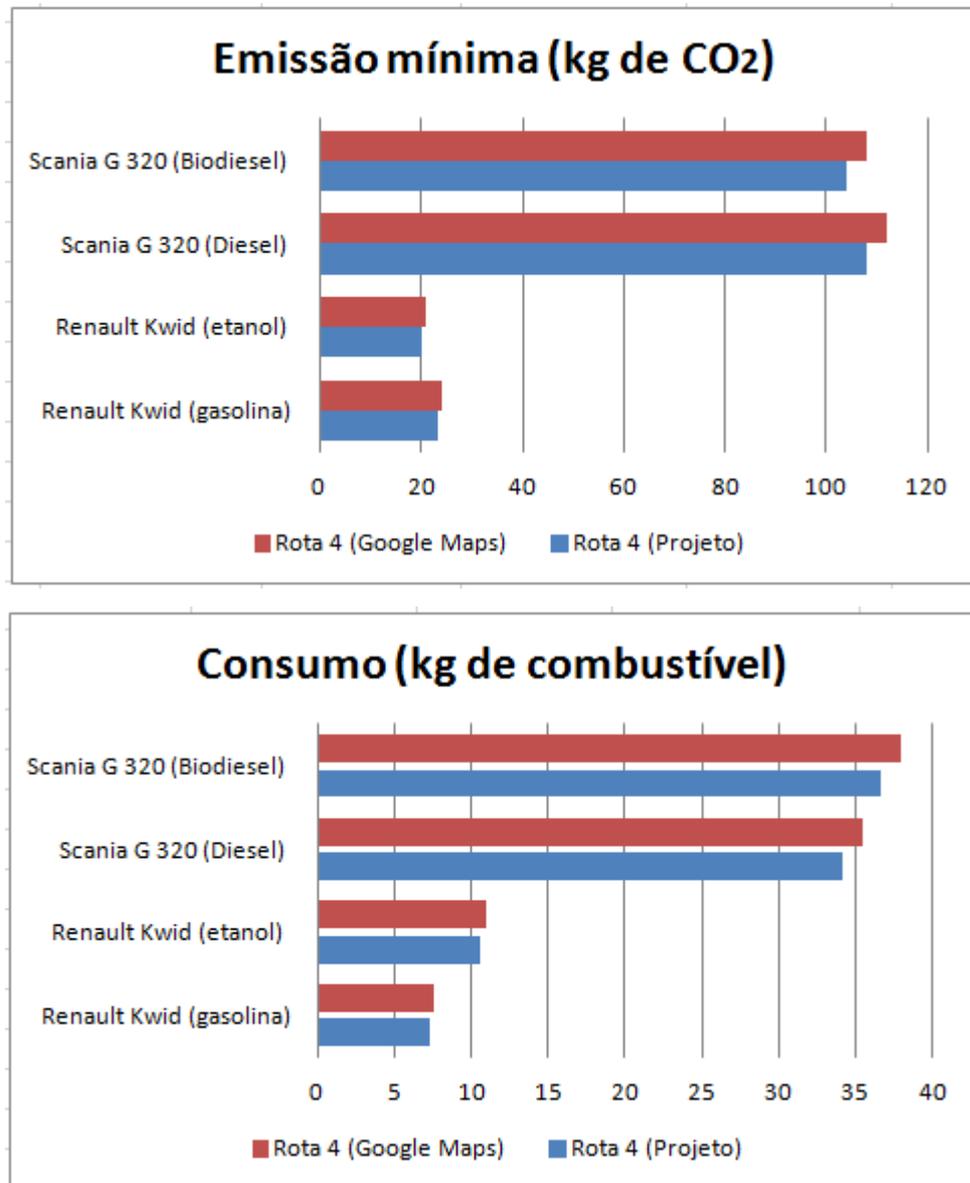


FONTE: GOOGLE MAPS, QGIS (2022)

O tempo de trajeto para a rota do Google Maps foi de 80 min e a distância foi de 92,6 km, já para a rota do modelo proposto o tempo foi de 85 min e a distância de trajeto foi de 96,4 km.

Comparando os dois roteirizadores, as rotas se diferenciam na região da cidade de Maringá, o modelo proposto por passar pelo vértice 24 e o Google Maps por passar pelos vértices 21 e 22. O GRÁFICO 12 mostra os resultados das emissões de  $CO_2$  e consumo de combustível para essas rotas.

GRÁFICO 12 – RESULTADOS OBTIDOS DE EMISSÃO DE  $CO_2$  GERADOS PELOS VEÍCULOS UTILIZADOS ALÉM DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM COMPARAÇÃO COM O GOOGLE MAPS (ROTA 4)



FONTE: O autor (2022)

Utilizando os dois veículos, a redução das emissões de  $CO_2$  e consumo de combustível foi de aproximadamente 3,5% para o modelo proposto em comparação ao Google Maps. Como esse vértice destino diferencia suas rotas na mesma região da rota 1 das “rotas planas” (região de Maringá), tais rotas tiveram a mesma porcentagem nas redução das emissões.

## 5.4 ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL

De acordo com Maas (2022) e BiodieselBR (2022) os preços médios por litro dos combustíveis utilizados nesse trabalho são R\$ 7,28 para a gasolina, R\$ 5,53 para o etanol, R\$ 6,61 para o diesel e R\$ 6,54 para o biodiesel segundo ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis).

Usando a rota 1 das “rotas planas”, a economia de combustível comparando as rotas do Google Maps e do modelo proposto desse trabalho é mostrada a seguir (equações 46 a 48), considerando as densidade dos combustíveis que são aproximadamente 0,730 kg/L para a gasolina, 0,803 kg/L para o etanol, 0,815 para o diesel e 0,860 para o biodiesel (ZUNIGA, 2011; SINDIPETRÓLEO, 2015):

$$\text{Custo gasolina (projeto)} = \frac{7,06819 \text{ kg}}{0,770 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 9,17946 \text{ L} * \text{R\$ } 7,28 = \text{R\$ } 66,83 \quad (46)$$

$$\text{Custo gasolina (Google Maps)} = \frac{7,32764 \text{ kg}}{0,770 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 9,51641 \text{ L} * \text{R\$ } 7,28 = \text{R\$ } 69,28 \quad (47)$$

$$\text{economia (gasolina)} = \text{R\$ } 69,28 - \text{R\$ } 66,83 = \text{R\$ } 2,45 \quad (48)$$

A economia de custo utilizando a gasolina foi de R\$ 2,45, utilizando o etanol à economia foi de R\$ 2,59 a mesma que para a gasolina, já para o diesel foi R\$ 10,39 e para o biodiesel foi de R\$ 10,46.

Agora usando a rota 4 das “rotas elevadas” a economia para a gasolina será de R\$ 17,50, R\$ 18,43 para o etanol, R\$ 80,99 para o diesel e R\$ 81,48 para o biodiesel.

Usando a rota 3 das “rotas mistas” a economia para a gasolina será de R\$ 15,33, R\$ 16,08 para o etanol, R\$ 49,38 para o diesel e R\$ 49,58 para o biodiesel.

Por mais que a economia não seja muito alta, uma empresa com vários veículos pesados pode gerar uma boa economia de custos, por exemplo, uma indústria com 10 veículos pesados (diesel) que viagem utilizando a rota 4 das “rotas elevadas” quatro vezes por mês cada, durante todo o ano, a economia para estes veículos serão R\$ 38.875,20/ano e para cada um R\$ 3.887,52/ano.

## 5.5 EMISSÕES DE $CO_2$

Comparando as emissões de  $CO_2$  calculadas nesse trabalho com as apresentadas segundo EPE (2005), utilizando como comparação a rota 1 das “rotas planas” (equações 49 e 50).

$$\text{consumo } L (\text{gasolina}) = \frac{7,06819 \text{ kg de combustível}}{0,77 \text{ kg/L}} = 9,17946 \text{ L} \quad (49)$$

$$\text{emissão } \frac{CO_2}{L} (\text{gasolina}) = \frac{22,40617 \text{ kg de } CO_2}{9,17946 \text{ L}} = 2,45 \frac{\text{kg de } CO_2}{L} \quad (50)$$

A emissão de  $CO_2$  por litro para a gasolina segundo EPE (2005) é de 2,82 kg de  $CO_2$  por litro, o que mostra uma diferença 13,12% entre o calculado e o real, essa diferença se dá principalmente por usar em parte dos cálculos valores médios e a coleta de dados podendo ter variações.

Para o etanol o calculado é de aproximadamente 1,53 kg de  $CO_2$  por litro enquanto o real é de 1,722 kg de  $CO_2$  por litro, para o diesel o calculado foi de 2,57 kg de  $CO_2$  por litro e o real é de 2,93 kg de  $CO_2$  por litro e para o biodiesel o calculado foi de 2,44 kg de  $CO_2$  por litro e o valor real é de 2,53 kg de  $CO_2$  por litro para o biodiesel etílico de soja.

## 6 CONCLUSÃO

Nesse capítulo são abordadas as considerações finais do trabalho, bem como possíveis trabalhos futuros utilizando do mesmo tema.

### 6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, o modelo proposto mostrou que pode ser um roteirizador alternativo que prioriza reduzir as emissões de  $CO_2$  geradas por veículos automotores e que garante também economia de combustível que em longo prazo pode acarretar em uma boa redução de custos para todos que utilizam o modal rodoviário, principalmente as indústrias que podem economizar até 19% de combustível em uma rota utilizando o modelo proposto do que o Google Maps.

O trabalho também mostrou a importância na utilização de biocombustíveis que podem em termos de mesmo consumo de combustível reduzir em até 42% as emissões de  $CO_2$ , que foi a comparação entre etanol e gasolina, já entre diesel e biodiesel a redução foi de até 10%.

Deste modo, o projeto mostra que a Logística Verde é de extrema importância para redução da degradação ambiental causada pela emissão de gases poluentes geradas por veículos automotores.

O trabalho também apresentou limitações do modelo proposto, como na coleta de dados, os valores de tempo não consideram semáforos e lombadas e os valores de desnível das vias são somente para cada ponto dos vértices, sem considerar os desníveis que há entre esses pontos.

Para trabalhos futuros, sugere-se uma adaptação das fórmulas para poder calcular as taxa de emissões emitidas por veículos elétricos, já que não utilizam um combustível líquido para se movimentar.

Sugere-se também a construção de um aplicativo para este modelo seria de ótima melhoria para principalmente coletar dados de distância, tempo e relevo, onde também eliminaria as limitações do modelo.

## REFERÊNCIAS

ALVARENGA, Tiago Henrique de Paula ; RODRIGUEZ, Carlos Manuel Taboada. Reflexões sobre a logística verde na redução dos impactos ambientais. **Recursos Naturais**, Santa Catarina, 26 maio 2018. v.11, n.1, p. 47-53.

ANDRADE, Eduardo Leopoldino. **Introdução à Pesquisa Operacional - Métodos e modelos para Análise de Decisões**. 5<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: GEN, 2018.

APROBIO, Associação dos Produtores de Biocombustíveis do Brasil. **Biodiesel e suas propriedades**. [S. l.], 12 jan. 2017. Disponível em: <https://aprobio.com.br/noticia/biodiesel-e-suas-propriedades#:~:text=O%20poder%20calor%C3%ADfico%20do%20biodiesel,utilizada%20no%20processo%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 16 jun. 2022.

ARAÚJO, Fernando; LIMA, Aline Andrade; LIMA, Mateus de Assis Chacon. Otimização de rota e redução dos custos logísticos: estudo de caso em uma empresa de contabilidade. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, 1 nov. 2017. v. 4, n. 1, p. 136-144.

ARENALES, M. et al. **Pesquisa operacional**. 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos**. 5<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BÁNKUTI, Sandra Mara Schiavi ; BÁNKUTI, Ferenc Istvan. Gestão ambiental e estratégia empresarial - um estudo em uma empresa de cosméticos no Brasil. **Gestão & Produção**, São Carlos, 6 dez. 2013. v. 21, n. 1, p. 171-184.

BARBIERI, José Carlos. **Gestão Ambiental Empresarial - Conceitos, modelos e instrumentos**. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: SARAIVA, 2007.

BARCELOS, Bartholomeo Oliveira ; EVANGELISTA , Mário Luiz Santos; SEGATTO, Sara Schafer. A importância e a aplicação da pesquisa operacional nos cursos de graduação em administração. **Revista de Administração de Contabilidade e Economia**, Rio Grande do sul, 2012. v. 11, n. 2, p.381-405.

BARROS, José Eduardo Mautone. Combustão. **Introdução a Combustão**, [s. l.], 2018.

BERCITO, Diogo; FLECK, Isabel; WATANABE, Phillippe. **Para driblar Trump, Europa planeja tratar Acordo de Paris com empresas**. [S. l.], 3 jun. 2017. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/ambiente/2017/06/1889926-para-driblar-trump-europa-planeja-tratar-acordo-de-paris-com-empresas.shtml>. Acesso em: 9 jun. 2019.

BIODIESELBR. **Preço médio do biodiesel na primeira semana do ano ficou em R\$ 6,54/Litro**. [S. l.], 14 jan. 2022. Disponível em:

<https://www.biodieselbr.com/noticias/usinas/producao/preco-medio-do-biodiesel-na-primeira-semana-do-ano-ficou-em-r-6-54-litro#:~:text=Produ%C3%A7%C3%A3o%20e%20consumo-,Pre%C3%A7o%20m%C3%A9dio%20do%20biodiesel%20na%20primeira%20semana%20do%20ano,R%24%206%2C54%2FLitro>. Acesso em: 18 jun. 2022.

BOWERSOX ET AL, Donald J. *et al.* **Gestão logística da cadeia de suprimentos**. 4ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

BRITO, Débora. **Efeito estufa: transporte responde por 25% das emissões globais**. [S. l.], 11 dez. 2018. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-12/efeito-estufa-transporte-responde-por-25-das-emissoes-globais>. Acesso em: 9 jun. 2019.

CARVALHO, J.L.R. *et al.* **Mudanças climáticas e aquecimento global: implicações na gestão estratégica de empresas do setor siderúrgico de Minas Gerais**. [S. l.], 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cebape/a/TQyvntvs8xJNTBTv4vqTsgp/?lang=pt>. Acesso em: 26 set. 2022.

CHAVES, Maria Cecília de Carvalho; GOMES, Carlos Francisco Simões. Avaliação de Biocombustíveis utilizando o apoio multicritério à decisão. **Produção**, Rio de Janeiro, 28 set. 2012. v. 24, n. 3, p. 495-507.

DEMIR, Emrah; BEKTAS, Tolga; LAPORTE, Gilbert. A comparative analysis of several vehicle emission models for road freight transportation. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Canadá, 2011. v. 16, n. 5, p. 347-357.

DIAS, Anderson Alberto C. *et al.* A atmosfera terrestre: Composição e estrutura. **Caderno de Física da UEFS**, Brasil, p. 21-40, 2007.

EIDELMAN, F. *et al.* **Inventário brasileiro das emissões de gases de efeito estufa – Valores preliminares**. [S. l.], 30 nov. 2009. Disponível em: [https://ecen.com/eee75/eee75p/inventario\\_brasil.htm](https://ecen.com/eee75/eee75p/inventario_brasil.htm). Acesso em: 26 set. 2022.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética *et al.* Potencial de Redução de Emissões de CO2 em Projetos de Produção e Uso de Biocombustíveis. **Estudo das Condições Estabelecidas no Tratado de Quioto**, [s. l.], 2005.

ERDOGAN, Sevgi; MILLER - HOOKS, Elise. A Green Vehicle Routing Problem. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, Estados Unidos, 12 jul. 2011. v. 48, n. 1, p. 100-114.

FELDMAN, B. **Motor a combustão: por que ele não presta?**. [S. l.], 26 nov. 2017. Disponível em: <https://autopapo.uol.com.br/noticia/motor-combustao-nao-presta/>. Acesso em: 16 jun. 2022.

GALI, Marcos Rodolfo. **Modelo Analítico de Resistência ao Rolamento de Pneus de Carga**. 2015. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, [S. l.], 2015.

GAZZONI, Décio Luiz. **Ciclo de vida do diesel e do biodiesel**. [S. l.], 7 maio 2007. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/colunistas/gazzoni/ciclo-vida-diesel-biodiesel-07-05-07>. Acesso em: 7 out. 2019.

GEBRAN, C.C. **Protocolo de Decisão na Escolha do Transporte Rodoviário**. 2012. Monografia (MBA em Gerência dos Sistemas Logísticos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

GIODA, Adriana. Comparação dos Níveis de Poluentes Emitidos pelos Diferentes Combustíveis Utilizados para Cocção e sua Influência no Aquecimento Global. **Química Nova**, [s. l.], v. 41, n. 8, p. 839-848, 2018.

GOOGLE MAPS, Platiform. **Elevation Service**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://developers-dot-devsite-v2-prod.appspot.com/maps/documentation/javascript/examples/elevation-simple>. Acesso em: 30 out. 2019.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física. 9ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2009. Volume 2. Hamburgo, Brasil, 2010. v. 7, n. 2, p. 113-122.

HOFFMANN, Felipe. **Os efeitos da área frontal sobre a aerodinâmica**. [S. l.], 2016. Disponível em: <http://bestcars.uol.com.br/bc/mais/cons-tecnico/os-efeitos-da-area-frontal-sobre-a-aerodinamica/>. Acesso em: 2 nov. 2019.

IBAMA, Instituto brasileiro do meio ambiente e dos recursos naturais renováveis. **Programa de controle de emissões veiculares (Proconve)**. Brasil, 6 dez. 2016. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/emissoes/veiculos-automotores/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>. Acesso em: 4 abr. 2019.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr.html>. Acesso em: 14 jun. 2022.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Frota de veículos**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120>. Acesso em: 26 set. 2022.

ILOS, Especialistas em Logística e Supply Chain. **Benefícios que a capotagem pode trazer ao país**. Brasil, 30 jan. 2019. Disponível em: <http://www.ilos.com.br/web/tag/matriz-de-transportes/>. Acesso em: 24 maio 2019.

JACOBI, P.R. *et al.* Mudanças climáticas globais: a resposta da educação. **Revista Brasileira de Educação**, [s. l.], v. 16, n. 46, 2011.

LEITE, Caio *et al.* A logística e a gestão da cadeia de suprimentos: um estudo de caso em uma empresa da região do sul de Minas Gerais. **Revista da Universidade do Vale do Rio Verde**, Minas Gerais, 19 mar. 2017. v. 15, n. 1, p. 676-688.

LOVÓN-CANCHUMANI, G.A. *et al.* Avaliação do Ciclo de Vida na Mineração: Estudos da produção de minério de ferro. **Série Estudos e Documentos**, Rio de Janeiro, n. 89, p. 1-80, 2015.

MAAS, A. **Preço da Gasolina hoje; valor médio é de R\$ 7,28**. [S. l.], 30 jul. 2022. Disponível em: <https://www.acheconcursos.com.br/governo/preco-gasolina-hoje-valor-medio-50883>. Acesso em: 18 jun. 2022.

MARQUES, L. **QGIS: Tudo o que você precisa saber**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://descomplicaqgis.com.br/qgis-o-que-e-o-que-faz-e-para-que-serve/>. Acesso em: 14 jun. 2022.

MÉNDEZ, Yasmín Salazar; GUARDIA, Luis Ernesto Torres. Problema do Caminho mais Curto – Algoritmo de Dijkstra. *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 2008, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2008.

MEYER, Maximiliano. **O que é excel?**. Brasil, 11 jul. 2013. Disponível em: <https://www.aprenderexcel.com.br/2013/tutoriais/o-que-e-excel>. Acesso em: 7 jun. 2019.

MOTA, Eduardo. **CO<sub>2</sub>: comparação das emissões indiretas dos carros elétricos com os de combustão**. Brasil, 29 ago. 2018. Disponível em: <https://pplware.sapo.pt/motores/carros-eletricos-vs-combustao-em-emissoes-de-co2/>. Acesso em: 7 out. 2019.

NAIME, Roberto ; ANDARA, Sabrina Gomes. Benefícios da implantação do sistema de gestão ambiental na indústria. **Gestão e Desenvolvimento**, Novo Hamburgo, Brasil, 2010. v. 7, n. 2, p. 113-122.

NOVACANA. **Propriedades Físico-Químicas do etanol**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.novacana.com/etanol/propriedades-fisico-quimicas#:~:text=O%20poder%20calor%C3%ADfico%20do%20etanol,calculado%20em%208%2C325%20Kcal%2FI.&text=Em%20geral%2C%20quanto%20maior%20a,maior%20%C3%A9%20seu%20poder%20calor%C3%ADfico>. Acesso em: 16 jun. 2022.

O ECO, Dicionario Ambiental. **O que é reserva da biosfera?** Rio de Janeiro, 26 jun. 2014. Disponível em: <https://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28448-o-que-e-uma-reserva-da-biosfera/>. Acesso em: 20 maio 2019.

OC, Observatório do Clima. **O que o Acordo de Paris significa para o Brasil?**. Brasil, 17 dez. 2015. Disponível em: <http://www.observatoriodoclima.eco.br/o-que-o-acordo-de-paris-significa-para-o-brasil/>. Acesso em: 24 maio 2019.

PASCHOAL, Anderson Oliveira de Ornelas. **Desenvolvimento e Aplicação de um Modelo para o Pollution Routing Problem**. 2015. Dissertação (Mestre em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [S. l.], 2015.

RENAULT, Kwid. Ficha Técnica Kwid. *In: Ficha Técnica Kwid*. [S. l.], 8 abr. 2017. Disponível em: [http://imprensa.renault.com.br/upload/produto/ficha-tecnica/kwid\\_2017-08-04\\_11-57-20.pdf](http://imprensa.renault.com.br/upload/produto/ficha-tecnica/kwid_2017-08-04_11-57-20.pdf). Acesso em: 1 nov. 2019.

RUFFO, G.H. **Diesel, Atkinson e Miller: conheça os ciclos mais econômicos de motor**. [S. l.], 18 jul. 2015. Disponível em: <https://flatout.com.br/diesel-atkinson-e-miller-conheca-os-ciclos-mais-economicos-de-motor/#:~:text=Orikassa%20confirma%3A%20%E2%80%9CA%20efici%C3%Aancia%20dos,mais%20for%C3%A7a%E2%80%9D%2C%20diz%20Orikassa>. Acesso em: 16 jun. 2022.

SANTOS, T. **Triângulo Retângulo**. [S. l.], 4 dez. 2018. Disponível em: <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/matematica/triangulo-retangulo>. Acesso em: 15 jun. 2022.

SCANIA G 320 b6x2\*4NB. [S. l.], 29 ago. 2016. Disponível em: [https://www.scania.com/content/dam/scanianoe/market/se/products-and-services/trucks/scania-hybrid/Vehiclespec\\_Hippogriffin\\_v2.pdf](https://www.scania.com/content/dam/scanianoe/market/se/products-and-services/trucks/scania-hybrid/Vehiclespec_Hippogriffin_v2.pdf). Acesso em: 8 out. 2019.

SCUSSEL, Alexandre. **Artigo: Por dentro do Google Maps**. [S. l.], 1 jul. 2013. Disponível em: <https://mundogeo.com/blog/2013/07/01/artigo-por-dentro-do-google-maps/>. Acesso em: 11 jun. 2019.

SEEG, Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. **Emissões dos Setores de Energia - Processos Industriais e Usos Produtivos**. Brasil, 2018.

SEIFFERT, Mari Elizabete Bernardini. ISO 14001 **Sistema de Gestão Ambiental - Implementação objetiva e econômica**. 4<sup>a</sup> ed. São Paulo: Atlas S.A, 2011.

SHARP, B. **Achar a V/1000**. [S. l.], 18 out. 2012. Disponível em: <http://www.autoentusiastasclassic.com.br/2012/10/achar-v1000.html>. Acesso em: 15 jun. 2022.

SILVA, D.C.M. **Potência e rendimento**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/potencia-rendimento.htm>. Acesso em: 17 jun. 2022.

SILVA, Edna L.; MENEZES, Estera M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 4. ed. rev. atual. Florianópolis: UFSC, 2005. 138p

SILVA, Mábíia Marelino Montalvão *et al.* EFEITOS DO DIÓXIDO DE CARBONO NA SAÚDE E NO MEIO AMBIENTE. *In: V PESQUISAR*, 2016, Goiás. **Anais [...]**. Goiás: [s. n.], 2016. v. 5.

SINDIPETRÓLEO. Tabelas de Conversões de Produtos. **Testes de Qualidade**, [s. l.], 2015.

SOUZA, Marcelo de. **Um método biobjetivo de alocação de tráfego para veículos convencionais e elétricos**. 2015. 77 p. Monografia de Especialização (Pós-Graduação em Computação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

TOLENTINO, Mario; FILHO, Romeu C. Rocha. A química no efeito estufa. **Química e Sociedade**, [s. l.], n. 8, p. 10-14, 1998.

TURRIONI, João Batista; MELLO, Carlos Henrique Pereira. Metodologia da pesquisa em Engenharia de Produção. Minas Gerais: UNIFEI, 2012. 199p.

VENTURI, Vanessa *et al.* Relação ar/combustível e consumo específico para formulações de diesel/biodiesel. **30º Reunião Anual Sociedade Brasileira de Química**, [s. l.], 2007.

WILHELM, V.E. Problema do Caminho Mínimo. **Departamento de Engenharia de Produção – UFPR**, [s. l.], 2022. Disponível em: [https://docs.ufpr.br/~volmir/ERE2/A\\_5\\_B\\_caminho\\_Minimo.pdf](https://docs.ufpr.br/~volmir/ERE2/A_5_B_caminho_Minimo.pdf). Acesso em: 26 set. 2022.

ZUNIGA, A.D.G. *et al.* Revisão: Propriedades Físico-químicas do Biodiesel. **Pesticidas: r. ecotoxicol. e meio ambiente**, Curitiba, v. 21, p. 55-72, 2011.