

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

RAFAEL LUÍS SACCO

**Implementação de corredores azuis na Região Sul do Brasil: uma avaliação
baseada no fluxo e na autonomia dos veículos pesados de carga**

SÃO PAULO

2024

RAFAEL LUÍS SACCO

Implementação de corredores azuis na Região Sul do Brasil: uma avaliação baseada no fluxo e na autonomia dos veículos pesados de carga

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.
Orientador: Prof. Dr. Thiago Luís Felipe Brito

Versão Corrigida

SÃO PAULO

2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Sacco, Rafael Luís.

Implementação de corredores azuis na Região Sul do Brasil: uma avaliação baseada no fluxo e na autonomia dos veículos pesados de carga. / Rafael Luís Sacco; orientador: Thiago Luís Felipe Brito. – São Paulo, 2024. 91 f.: il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Combustíveis alternativos. 2. Transporte de cargas. 3. Gás natural. 4. Corredores azuis. 5. Otimização. I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Nome: SACCO, Rafael Luís

Título: Implementação de corredores azuis na Região Sul do Brasil: uma avaliação baseada no fluxo e na autonomia dos veículos pesados de carga

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Energia.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Presidente: _____ Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar forças para viver e por me mostrar os caminhos da vida. Agradeço à toda minha família, que sempre esteve comigo ao longo da minha trajetória, me apoiando e incentivando a atingir os meus objetivos. Agradeço à minha querida esposa pelo seu amor incondicional e por compreender minha dedicação a este projeto.

Agradeço imensamente ao meu orientador, o Prof. Dr. Thiago Luis Felipe Brito, pela orientação, apoio e paciência durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho. Também quero agradecer aos professores Edmilson Moutinho dos Santos e Hirdan Katarina de Medeiros Costa por me acompanharem de perto ao longo dessa minha jornada.

Agradeço também a todos os professores do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo que, por meio das atividades acadêmicas, ampliaram a minha percepção sobre o mundo e contribuíram para o meu desenvolvimento profissional.

Por fim, agradeço o apoio do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas na Cláusula de PD&I da Resolução ANP nº 918/2023 (PRH 33.1 - Referente ao EDITAL Nº1/2018/PRH-ANP; Convênio FINEP/FUSP/USP Ref. 0443/19).

“Se eu não fosse imperador, desejaria ser professor. Não conheço missão maior e mais nobre que a de dirigir as inteligências jovens e preparar os homens do futuro.”

D. Pedro II

RESUMO

SACCO, R. L. **Implementação de corredores azuis na Região Sul do Brasil: uma avaliação baseada no fluxo e na autonomia dos veículos pesados de carga.** 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

O transporte de cargas na Região Sul do Brasil é predominantemente realizado por caminhões movidos a diesel, um combustível fóssil com grande potencial de danos ao meio ambiente e à saúde humana quando liberado na atmosfera após a sua combustão. Apresentando menores emissões de poluentes e gases de efeito estufa, o gás natural surge como uma alternativa ao diesel. Entretanto, para que o mesmo seja amplamente adotado pelo mercado consumidor, é crucial o desenvolvimento de uma infraestrutura de abastecimento robusta garantindo que os veículos possam realizar suas viagens de ida e volta sem o risco de ficarem desabastecidos. Baseando-se no fluxo regional de caminhões e em suas respectivas autonomias, este trabalho avaliou a instalação de postos de abastecimento ao longo das principais rodovias da Região Sul do Brasil de forma a criar rotas que viabilizem a circulação de caminhões movidos a gás natural, também conhecidas como “corredores azuis”. Três cenários foram criados variando a autonomia dos veículos. O cenário 1 buscou contemplar os caminhões movidos a Gás Natural Comprimido (GNC), com uma autonomia de até 400 km. Os cenários 2 e 3 buscaram contemplar os caminhões movidos a Gás Natural Liquefeito (GNL), com autonomias de até 600 e 800 km, respectivamente. O *Flow-Refueling Location Model*, um modelo de otimização oriundo da pesquisa operacional, foi utilizado visando maximizar o atendimento do fluxo de veículos dada uma quantidade limitada de postos de abastecimento disponíveis. Foram considerados 34 potenciais locais para instalação de postos de abastecimento ao longo de toda a Região Sul do Brasil. Observou-se que, mesmo com postos de abastecimento instalados em todos os potenciais locais, os cenários 1 e 2 atenderiam no máximo 89,6 % e 97,1 % do fluxo regional de caminhões, respectivamente. Por outro lado, com apenas 19 postos instalados de forma otimizada ao longo das rodovias sulistas, todos os fluxos regionais de veículos poderiam ser atendidos no cenário 3. Evidenciou-se uma importante relação entre o desenvolvimento tecnológico da indústria automobilística e a implementação de corredores azuis: veículos com maiores autonomias demandariam uma infraestrutura de abastecimento mais enxuta.

Palavras-chave: Combustíveis alternativos. Transporte de cargas. Gás natural. Corredores azuis. Otimização.

ABSTRACT

SACCO, R. L. **Blue Corridors' implementation in Southern Brazil: an evaluation based on the flow and range of heavy-duty vehicles.** 2024. Master Thesis (Master of Science) – Institute of Energy and Environment (IEE), University of São Paulo, São Paulo, 2024.

Freight transportation in Southern Brazil is predominantly carried out by heavy-duty vehicles running on diesel, a fossil fuel with great potential to negatively impact the environment and human health when released into the atmosphere after combustion. Natural gas can be an alternative fuel with lower emissions of pollutants and greenhouse gases. However, to be widely adopted by the consumer market, a robust supply infrastructure of natural gas stations must be developed to ensure that vehicles can complete their trip without running out of gas. This study investigates optimal gas station allocation across the road network of Southern Brazil, aiming to create routes that enable natural gas-powered trucks to travel, also known as blue corridors. An optimization model from operational research (the Flow-Refueling Location Model) was used to indicate the best places for gas station allocation based on traffic flows and vehicles' range. This study was conducted under three scenarios of evaluation. Scenario 1 considered trucks running on Compressed Natural Gas (CNG) with a range of up to 400 km. Scenarios 2 and 3 considered trucks running on Liquefied Natural Gas (LNG) with ranges of up to 600 and 800 km, respectively. Thirty-four potential sites for gas station allocation were evaluated throughout Southern Brazil. The maximum captured flow rates of scenarios 1 and 2 were 89.6 % and 97.1 %, respectively, even with all potential sites having a gas station allocated to them. However, all flows were captured in scenario 3, with only 19 gas stations optimally allocated across the road network. It revealed an essential relationship between the technical development of the automobile industry and the deployment of blue corridors: vehicles with higher ranges require leaner infrastructure.

Keywords: Alternative fuels. Freight transport. Natural gas. Blue corridors. Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo final energético (em ktep) por setor e consumo do setor de transportes por modal no ano de 2021..	14
Figura 2 - Consumo final anual de óleo diesel de origem fóssil no Brasil, 2012-2021.	15
Figura 3 - Gases de efeito estufa (em tCO _{2eq}) emitidos pelo modal rodoviário brasileiro e nos estados da Região Sul do Brasil no ano de 2021..	16
Figura 4 - Gases de efeito estufa (em MtCO _{2eq}) emitidos por caminhões nos estados da Região Sul do Brasil, entre 1990 e 2021..	17
Figura 5 - Mapa do resultado final do estudo “ <i>Blue Corridor Project</i> ” para a Rota 1: Moscou (Rússia), Minsk (Bielorrússia), Varsóvia (Polônia) e Berlim (Alemanha)	22
Figura 6 - Mapa do estudo de oportunidade de implementação de corredor azul na parte sul do continente latino-americano.	23
Figura 7 - Corredores azuis para o estado de São Paulo, considerando os cenários 1 (linha cheia, limitado às regiões com presença de gasodutos) e 2 (linha pontilhada, para todo o estado, independente da presença de gasodutos).	25
Figura 8 - Processo de modelagem.	28
Figura 9 - Nível de abstração para o desenvolvimento de um modelo.	30
Figura 10 - Representação gráfica para um problema de P-medianas..	32
Figura 11 - Solução ótima do modelo FCLM.	40
Figura 12 - Porcentagem do fluxo atendido em função do (i) número de facilidades p instaladas, da (ii) autonomia dos veículos e do (iii) tipo de função objetivo	41
Figura 13 - Mapa do estado da Flórida com a localização ótima dos postos de abastecimento para $p = 25$, considerando os veículos com autonomies de 50 e 100 milhas	42
Figura 14 - Resumo esquemático das etapas de desenvolvimento deste trabalho, dos materiais e métodos para atender cada uma delas e dos resultados obtidos.	43
Figura 15 - Mapa da Região Sul do Brasil, com suas respectivas regiões imediatas e intermediárias e as principais rodovias federais da região.	45
Figura 16 - Classificação veicular adotada pela pesquisa de OD do PNT dos anos de 2016 e 2017	46
Figura 17 - Mapa de localização dos potenciais pontos de abastecimento.	49
Figura 18 - Caminho mais curto entre os pontos de origem e destino "M" e "N1"	53
Figura 19 - Rodovias federais e os fluxos regionais de veículos considerados neste trabalho.	58

Figura 20 - Corredores azuis formados pela instalação ótima de um único posto de abastecimento na Região Sul do Brasil para os cenários com veículos de 400, 600 e 800 km de autonomia.	60
Figura 21 - Corredores azuis formados pela instalação ótima de dois postos de abastecimento na Região Sul do Brasil para os cenários com veículos de 400, 600 e 800 km de autonomia.	62
Figura 22 - Porcentagem do fluxo de caminhões atendidos em função do número de facilidades instaladas, construído com base nos resultados obtidos após a execução do modelo <i>Flow-Refueling Location Model</i>	63
Figura 23 - Corredores azuis formados pela instalação ótima de 26 e 20 postos de abastecimento na Região Sul do Brasil para os cenários com veículos de 400 e 600 km de autonomia, respectivamente	65
Figura 24 - Corredores azuis formados pela instalação ótima de 19 postos de abastecimento na Região Sul do Brasil para os cenários com veículos de 400, 600 e 800 km de autonomia.....	64
Figura 25 - Corredores azuis formados pela instalação de postos de abastecimento em pontos próximos ao gasoduto GASBOL na Região Sul do Brasil para os cenários com veículos de 400 e 600 km de autonomia.....	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Objetivos específicos do trabalho.	19
Quadro 2 - Definição dos elementos do modelo <i>P-Median</i>	33
Quadro 3 - Definição dos elementos do modelo <i>MCLP</i>	34
Quadro 4 - Definição dos elementos do modelo <i>FCLM</i>	35
Quadro 5 - Definição dos elementos do modelo <i>FRLM</i>	37
Quadro 6 - Autonomia dos veículos e situação representada.	47
Quadro 7 - Dez maiores fluxos entre os pares de origem e destino.	51
Quadro 8 - Potenciais pontos de abastecimento pertencentes aos caminhos mais curtos dos pares de origem e destino com os dez maiores fluxos.	53
Quadro 9 - Combinações de potenciais pontos de abastecimento que conseguem abastecer o par de origem e destino "M" e "N1", considerando veículos com autonomias de 400 km, 600 km e 800 km.	55
Quadro 10 - Definição dos elementos do modelo <i>FRLM</i> aplicados ao contexto deste trabalho	56

LISTA DE SIGLAS

°C	Grau Celsius
CH ₄	Gás Metano
C ₂ H ₆	Gás Etano
C ₃ H ₈	Gás Propano
C ₄ H ₁₀	Gás Butano
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DFRLM	<i>Deviation-Flow Refueling Location Model</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCLM	<i>Flow-Capturing Location Model</i>
FRLM	<i>Flow-Refueling Location Model</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GNC	Gás Natural Comprimido
GNL	Gás Natural Liquefeito
GNV	Gás Natural Veicular
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ktep	Mil toneladas equivalentes de petróleo
MCLP	<i>Maximal Coverage Location Problem</i>
MMm ³ /d	Milhões de metros cúbicos por dia
MtCO _{2eq}	Milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente
NO _x	Óxidos de nitrogênio
OD	Par de Origem e Destino
PNE 2050	Plano Nacional de Energia para 2050
PNT	Pesquisas Nacionais de Tráfego
SO _x	Óxidos de enxofre

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. Objetivos	19
1.2. Estrutura do Trabalho	20
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1. Corredores azuis (<i>Blue corridors</i>)	21
2.2. Pesquisa operacional	27
2.2.1. Histórico de desenvolvimento da pesquisa operacional.....	28
2.2.2. Modelagem matemática	30
2.2.3. Modelos de localização e alocação de recursos	31
2.2.4. Métodos de solução	38
2.3. Estudos de caso	38
2.3.1. Estudo de caso 1: FCLM em Edmonton, Canadá	39
2.3.2. Estudo de caso 2: FRLM na Flórida, Estados Unidos.....	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1. Dados utilizados.....	44
3.1.1. Dados georreferenciados	44
3.1.2. Origem e destino dos veículos pesados de carga	45
3.1.3. Autonomia dos veículos	47
3.2. Metodologia	48
3.2.1. Etapa 1: localização dos potenciais pontos de abastecimento.....	49
3.2.2. Etapa 2: designação dos fluxos de veículos em cada potencial ponto de abastecimento.....	50
3.2.3. Etapa 3: determinação dos caminhos mais curtos entre pontos de origem e destino	52
3.2.4. Etapa 4: determinação das combinações dos potenciais pontos de abastecimento que abastecem o fluxo de veículos em cada caminho.....	54
3.2.5. Etapa 5: maximização dos fluxos de veículos atendidos em função do número de postos de abastecimento alocados na rede	55
3.2.6. Etapa 6: análise comparativa dos resultados	57
4. RESULTADOS	58
4.1. Fluxos atendidos em função do número de facilidades instaladas.....	59

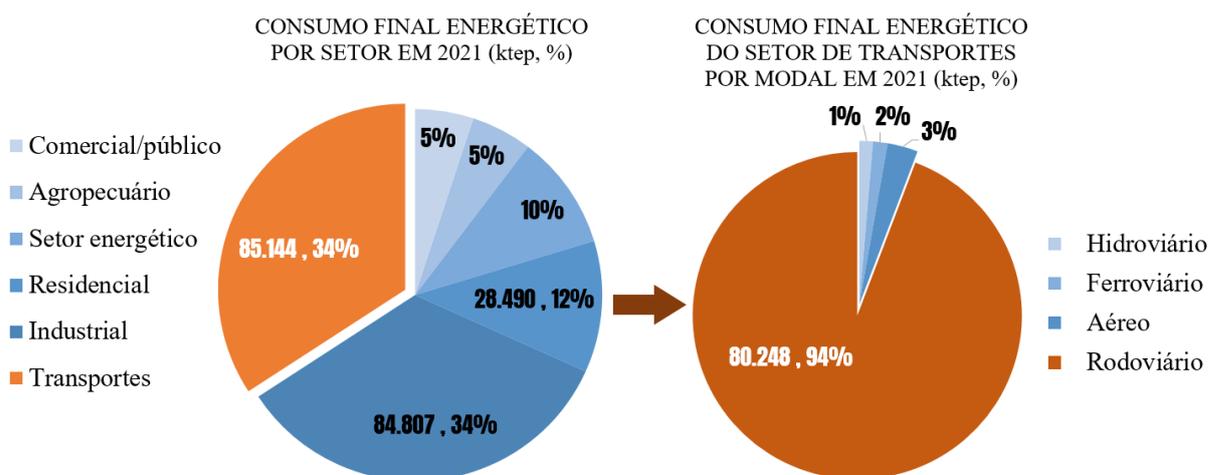
4.2. Análise comparativa dos resultados.....	63
4.3. Discussão dos resultados e implicações.....	67
4.4. Limitações do estudo	70
5. CONCLUSÕES.....	72
REFERÊNCIAS.....	74
APÊNDICES.....	80

1. INTRODUÇÃO

A maior parte do transporte de cargas no Brasil é realizada pelo modal rodoviário. Segundo dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT), o modal rodoviário foi responsável por 64,7% de todo o transporte de cargas no país em 2021, sendo a frota de caminhões constituída de 99,89% de veículos movidos a diesel, 0,07% de veículos movidos a gás natural e 0,04% de veículos movidos a eletricidade (CNT, 2022). Essa alta concentração na utilização do óleo diesel para o transporte de cargas faz com que este seja o combustível mais consumido pelo setor de transportes no Brasil (representando 46,3% do consumo total em 2021), seguido pelos combustíveis gasolina (27,5%), álcool etílico hidratado (11,1%), álcool etílico anidro (7,3% - que é misturado à gasolina), biodiesel (5,3% - que é misturado ao óleo diesel de origem fóssil) e gás natural (2,4%) (EPE, 2021).

Responsável por aproximadamente um terço do consumo final energético brasileiro, o setor de transportes consumiu 85.144 mil toneladas equivalentes de petróleo (ktep) no ano de 2021. Dentre os modais que compõem o setor de transportes, o rodoviário foi o mais representativo com 94,2% desse consumo, seguido pelos modais aéreo (3,0%), ferroviário (1,4%) e hidroviário (1,3%) (EPE, 2021). A Figura 1 mostra o consumo final energético brasileiro (248.991 ktep) por setor e o consumo do setor de transportes por modal no ano de 2021, evidenciando a grande relevância do modal rodoviário para a logística nacional.

Figura 1 – Consumo final energético (em ktep) por setor e consumo do setor de transportes por modal no ano de 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em EPE (2021).

Sendo a principal fonte energética para o setor de transportes, parte do óleo diesel consumido pelo modal rodoviário brasileiro deve ser importada de outros países, como os Estados Unidos, Índia, Emirados Árabes, Arábia Saudita, entre outros (ANP, 2022). A necessidade de importação de uma fonte energética externa coloca o Brasil em uma posição de

maior vulnerabilidade. O acesso à energia e a segurança na oferta são alguns dos fatores fundamentais para garantir a segurança energética de um país, principalmente quando o mesmo possui a sua cadeia de suprimentos ancorada em um único insumo (ANG; CHOONG; NG, 2015; SOVACOOOL, 2013).

Ao longo dos últimos anos, o Brasil vem aumentando a sua dependência externa por óleo diesel. A Figura 2 mostra a evolução do consumo final de óleo diesel de origem fóssil no Brasil entre os anos de 2012 e 2021, destacando-se a fração importada. Nota-se um crescimento da necessidade de importação do insumo no período para que a demanda de cada ano pudesse ser atendida. Desde 2017, a fração importada sempre esteve maior que 20% do consumo total, alcançando o maior valor em 2021 (25,5%) (EPE, 2021).

Figura 2 – Consumo final anual de óleo diesel de origem fóssil no Brasil, 2012-2021.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em EPE (2021).

O óleo diesel é oriundo do processo de refino do petróleo bruto, sendo um combustível líquido utilizado em motores ciclo diesel, de combustão interna e ignição por compressão. Sua composição é formada majoritariamente por hidrocarbonetos com cadeias de 8 a 16 carbonos, podendo conter, em menor proporção, nitrogênio, enxofre e oxigênio (PETROBRÁS, 2021). Entre os principais poluentes emitidos pela combustão do óleo diesel, encontram-se os materiais particulados, óxidos de nitrogênio (NOx), óxidos de enxofre (SOx), e o monóxido de carbono (CO), que impactam negativamente as condições ambientais e aumentam os riscos à saúde humana (LOBKOV, 2005; REŞITOĞLU; ALTINIŞIK; KESKIN, 2015).

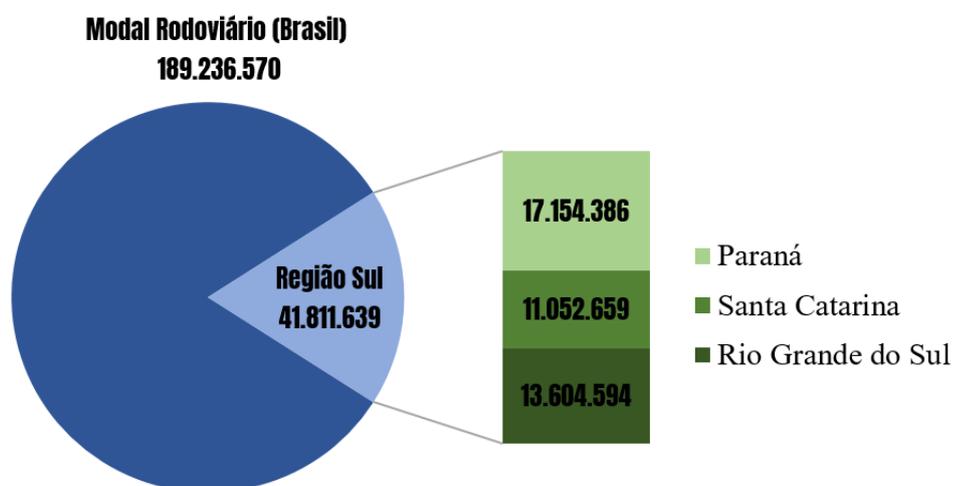
Além disso, o atual uso intenso do óleo diesel pelo setor de transportes possui grande potencial de agravar o desequilíbrio do clima devido a liberação de gases de efeito estufa após a queima do combustível nos motores dos veículos. Gases de efeito estufa são substâncias gasosas que absorvem e retêm o calor na superfície terrestre. O principal deles é o dióxido de

carbono (CO₂), um gás inerte e não tóxico, porém associado ao agravamento das mudanças climáticas quando liberado em excesso (LOBKOV, 2005; UNFCCC, 2023).

Uma forma de se comparar o impacto de diferentes gases no efeito estufa terrestre é a utilização de uma medida baseada no potencial de aquecimento global de cada tipo de gás convertido em dióxido de carbono equivalente, ou CO₂ equivalente (IPAM, 2023). Estima-se que o setor de transportes brasileiro foi responsável pela emissão de 203,8 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO_{2eq}) na atmosfera no ano de 2021, representando 46,9% do total emitido pelo setor de energia. No mesmo ano, representando 92,8% das emissões do setor de transportes, o modal rodoviário foi responsável por emitir 189,2 MtCO_{2eq} na atmosfera, sendo quase a metade disso referente ao transporte pesado de cargas (86,3 MtCO_{2eq}) (SEEG, 2022).

Composta pelos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, a Região Sul do Brasil foi responsável por 22,1% (41,8 MtCO_{2eq}) das emissões do modal rodoviário brasileiro e 22,3% (19,3 MtCO_{2eq}) das emissões oriundas do uso de caminhões no Brasil¹ em 2021, sendo responsável por movimentar apenas 17,2% do produto interno bruto nacional em 2019 (IBGE, 2020; SEEG, 2022). A Figura 3 mostra as emissões de CO_{2eq} do modal rodoviário no Brasil e nos estados da Região Sul do Brasil. Já a Figura 4 mostra os gases de efeito estufa emitidos por caminhões nos três estados da Região Sul do Brasil entre os anos de 1990 e 2021. Em três décadas, as emissões de gases de efeito estufa mais que dobraram na região, saindo de um patamar um pouco acima de 8,0 MtCO_{2eq} em 1990 para quase 20,0 MtCO_{2eq} em 2021 (SEEG, 2022).

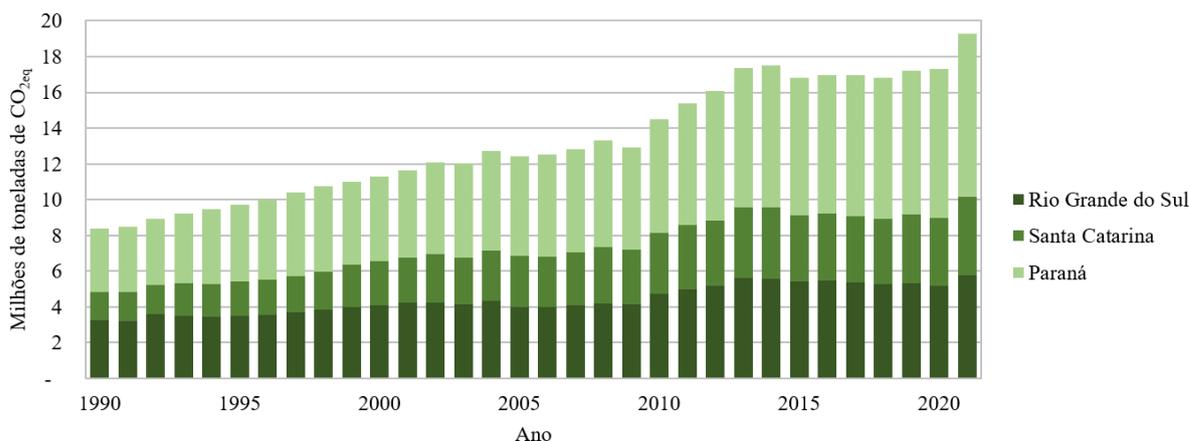
Figura 3 – Gases de efeito estufa (em tCO_{2eq}) emitidos pelo modal rodoviário brasileiro e nos estados da Região Sul do Brasil no ano de 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em SEEG (2022).

¹ 9,1 MtCO_{2eq} no Paraná; 4,4 MtCO_{2eq} em Santa Catarina; 5,8 MtCO_{2eq} no Rio Grande do Sul (SEEG, 2022).

Figura 4 – Gases de efeito estufa (em MtCO₂eq) emitidos por caminhões nos estados da Região Sul do Brasil, entre 1990 e 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em SEEG (2022).

Visando reduzir o monopólio que o óleo diesel exerce como principal fonte energética para o transporte de cargas, bem como diminuir seus impactos ambientais gerados pelas emissões de poluentes e gases de efeito estufa na atmosfera após a sua combustão, diversos autores e instituições propõem a substituição do diesel por outros combustíveis. Alguns dos potenciais substitutos são o biodiesel, células a combustível utilizando hidrogênio, eletricidade, gás natural (comprimido ou liquefeito) e veículos híbridos (MACHADO *et al.*, 2021). Além disso, especialmente para o cenário brasileiro, também é debatida a diversificação do transporte de cargas para outros modais mais eficientes que o rodoviário, como o ferroviário e o hidroviário, por exemplo, otimizando o consumo energético do setor (RODRIGUE, 2020). Este trabalho considerará nas análises o gás natural como alternativa ao uso do diesel para o transporte de cargas realizado por modal rodoviário.

Constituído principalmente por hidrocarbonetos leves, o gás natural é composto, em sua maior parte, pelo gás metano (CH₄), seguido pelos gases etano (C₂H₆), propano (C₃H₈), butano (C₄H₁₀) e, em menores quantidades, por outros gases da série parafínica² de pesos moleculares maiores. O gás natural destinado ao uso veicular é comumente chamado de Gás Natural Veicular (GNV), que pode ser de origem fóssil ou renovável (o chamado biometano, formado por meio da biodigestão de bactérias anaeróbicas presentes em matérias orgânicas) (ANP, 2020; SELLEY; SONNENBERG, 2015).

As principais vantagens da substituição do óleo diesel pelo gás natural para a realização do transporte de cargas são: menores emissões de poluentes e gases de efeito estufa após a combustão no motor, redução da demanda por petróleo aproveitando a ampla disponibilidade do gás natural no mundo, competitividade do gás natural como combustível e desenvolvimento

² Séries parafínicas são hidrocarbonetos compostos basicamente por n átomos de carbono e $2n+2$ átomos de hidrogênio (SELLEY; SONNENBERG, 2015).

tecnológico já existente de veículos movidos a gás natural (GALBIERI *et al.*, 2018; ROSE *et al.*, 2013; SEMIN, 2008; STOCCHETTI; VOLPATO, 2010). Para Stocchetti e Volpato (2010), o gás natural para uso veicular se apresenta como uma excelente alternativa para países como os Estados Unidos, Brasil e China, por exemplo, que buscam minimizar seus impactos ambientais atrelados ao setor de transporte. Entretanto, os autores declaram a importância de uma ampla rede de distribuição de gás natural para a garantia do abastecimento dos veículos ao longo de seus trajetos.

Importantes instituições internacionais também propõem a substituição do uso do diesel pelo gás natural e biocombustíveis em veículos automotores. No relatório de planejamento ambiental para 2050 da *World Wide Fund for Nature* (WWF), o gás natural é apresentado como um potencial vetor para a transição energética em direção a combustíveis com menores impactos ambientais (AYUKAWA *et al.*, 2007). Nessa mesma linha, o relatório da *World Energy Council* (WEC) afirma que o gás natural, não só já vem contribuindo para a redução de emissões no setor de transportes de alguns países (como Índia, China e Austrália), como também ganhará cada vez mais espaço no setor de transporte pesado até 2050 (WEC, 2013).

No Brasil, o Plano Nacional de Energia para 2050 (PNE 2050), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020a), considera em seu planejamento de transição energética o uso de combustíveis alternativos ao diesel para o transporte de cargas no país. Entre eles, encontram-se as diversas formas do gás natural: o gás natural liquefeito (GNL), gás natural veicular (GNV) e o biometano, este último complementando o mercado principalmente em escala regional. O PNE 2050 entende que a penetração dessas alternativas na frota nacional deverá ocorrer de forma gradativa nos próximos anos (EPE, 2020a).

No entanto, o PNE 2050 reconhece os desafios logísticos e de infraestrutura no Brasil para que haja a ampla produção, importação e distribuição de gás natural aos consumidores finais. Segundo o plano (EPE, 2020a, p. 216):

[...] o GNL necessitará do estabelecimento de ampla infraestrutura de produção, importação e abastecimento para uma maior penetração desta fonte no País. O GNV e o biometano, por sua vez, encontram entre os principais desafios a ampliação da malha existente, transformando-o em uma alternativa nacional. Ambos os combustíveis possuem como desafios o deslocamento de fontes já estabelecidas e, como tal, o desafio é conseguir atratividade na ótica dos seus consumidores, destacando-se o tempo de retorno do investimento, segurança na disponibilidade do combustível, superar as assimetrias de informações e desenvolvimento de um mercado de revenda de veículos usados com essas tecnologias.

Nesse sentido, a ampla comercialização do gás natural para o atendimento da demanda de veículos pesados de carga passa por um dilema: potenciais consumidores são relutantes em adquirir veículos movidos a gás natural até que haja uma infraestrutura robusta que garanta o abastecimento dos veículos ao longo dos trajetos, enquanto comerciantes de gás natural são

relutantes em investir em novos postos de abastecimento até que o mercado consumidor seja mais robusto (UNECE, 2003). Para pôr fim a este ciclo vicioso, algumas iniciativas ao redor do mundo, com o envolvimento do setor público, universidades e instituições privadas, vêm desenvolvendo projetos que buscam a criação de rotas que viabilizem as viagens de ida e volta de caminhões movidos a gás natural sem que eles fiquem desabastecidos ao longo dos seus trajetos: os chamados corredores azuis (IGU; UNECE, 2012; MOUETTE *et al.*, 2019; UNECE, 2003).

A criação de corredores azuis na Região Sul do Brasil poderia abrir caminho para maiores investimentos das empresas na diversificação da frota regional de caminhões em direção a veículos movidos a gás natural, tornando a região menos dependente do óleo diesel para o transporte de cargas e reduzindo os impactos ambientais do setor. A seção 1.1 aborda o objetivo deste trabalho, bem como a lacuna na literatura que este estudo pretende preencher.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo avaliar a implementação de corredores azuis na Região Sul do Brasil utilizando como base o fluxo regional de caminhões, de forma que seja atendido o maior número de veículos possível dada uma quantidade limitada de postos de abastecimento instalados ao longo da rede rodoviária sulista. Para isso, será utilizado um método oriundo da pesquisa operacional: o *Flow-Refueling Location Model* (FRLM), modelo que busca otimizar a alocação de postos de abastecimento em uma determinada rede de vias levando em consideração a autonomia dos veículos consumidores. Assim, pretende-se integrar os temas de transição energética, pesquisa operacional e transportes de cargas no Brasil.

Visando atender o objetivo principal deste trabalho, dividiu-se o mesmo em três objetivos específicos conforme descritos pelo Quadro 1.

Quadro 1 – Objetivos específicos do trabalho.

Descrição
1. Traçar um panorama sobre o tema de corredores azuis, abordando a origem do conceito, as principais motivações que levaram à sua concepção e alguns projetos e/ou estudos atuais na Região Sul do Brasil.
2. Avaliar, selecionar e aplicar um método da pesquisa operacional que possibilite otimizar a alocação de postos de abastecimento em uma rede rodoviária, levando em consideração a autonomia dos veículos.
3. Criar as condições de contorno para a aplicação do modelo e avaliar crítica e contextualmente os resultados do mesmo considerando o caso da Região Sul do Brasil.

Fonte: Organizado pelo autor.

Algumas iniciativas já propuseram a criação de corredores azuis atendendo partes da Região Sul do Brasil³. Entretanto, com uma visão sistêmica do fluxo de veículos pesados de carga em toda a região, juntamente com a utilização de um modelo de pesquisa operacional para o desenvolvimento de soluções otimizadas, este trabalho traz para a literatura um racional inovador no que diz respeito à implementação de corredores azuis na Região Sul do Brasil.

Este trabalho teve como motivação alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas para o Brasil: (i) energia limpa e acessível; (ii) indústria, inovação e infraestrutura; e (iii) ação contra a mudança global do clima. Estes objetivos referem-se aos ODS 7, 9 e 13, respectivamente, disponíveis no sítio eletrônico das Nações Unidas no Brasil (2024). A seção 1.2 descreve a estrutura do trabalho e resume os temas de cada capítulo.

1.2. Estrutura do Trabalho

O Capítulo 1 deste trabalho introduz o tema, apresenta a sua relevância no cenário internacional e descreve o objetivo. Em seguida, o Capítulo 2 revisa a literatura, abordando o conceito de corredores azuis, os principais modelos de otimização de localização e alocação de recursos escassos e a análise de dois estudos de caso. O Capítulo 3 descreve os dados utilizados ao longo do desenvolvimento deste trabalho bem como a metodologia adotada. O Capítulo 4 apresenta os resultados e analisa as soluções ótimas indicadas pelo modelo. O Capítulo 5 refere-se às considerações finais e às conclusões, incluindo as limitações do estudo e oportunidades para trabalhos futuros. Por fim, encontram-se as seções de referências bibliográficas que fundamentaram o estudo e os apêndices.

³ Mais detalhes sobre a criação de corredores azuis na Região Sul do Brasil são encontrados na seção 2.1.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A seção 2.1 abordará o conceito de corredores azuis: rodovias que, por possuírem postos de abastecimento para veículos movidos a gás natural, permitem que os mesmos possam realizar suas viagens de ida e volta sem o risco de ficarem desabastecidos. A seção 2.2 abordará o conceito de pesquisa operacional, bem como os principais modelos de localização e alocação de recursos. Visando encontrar soluções otimizadas de forma a considerar as particularidades de cada situação, a utilização da pesquisa operacional para a modelagem e resolução de problemas permite que estes possam ser racionalizados e pensados de maneira sistêmica. Por fim, dois estudos de caso serão abordados pela seção 2.3. A seção 2 buscou atender aos objetivos específicos 1 e 2 deste trabalho conforme descrito pelo Quadro 1.

2.1. Corredores azuis (*Blue corridors*)

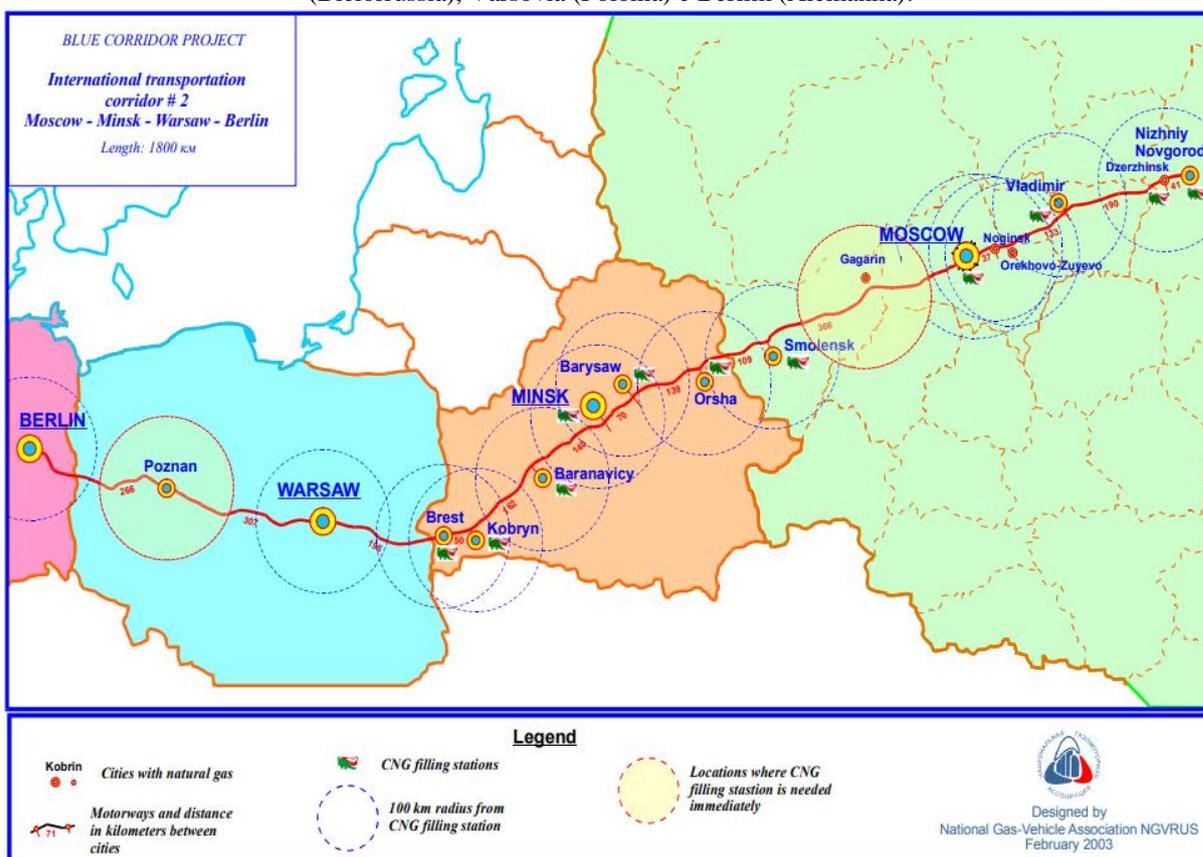
Rotas que viabilizam a circulação de veículos movidos a gás natural podem ser chamadas de corredores azuis, tradução direta do termo em inglês: *blue corridors*. O primeiro estudo que desenvolveu o conceito de corredores azuis foi o “*Blue Corridor Project*”, idealizado inicialmente pela Fundação Vernadsky em Moscou, Rússia, no ano de 2000, e posteriormente publicado no relatório “*Blue Corridor Project: on the use of natural gas as a motor fuel in international freight and passenger traffic*”, elaborado juntamente com a Comissão Econômica para a Europa das Nações Unidas, em 2003 (BRITO, 2019; MOUETTE *et al.*, 2019; UNECE, 2003).

O “*Blue Corridor Project*” teve como principal objetivo estabelecer a infraestrutura necessária para a implementação de rotas para o transporte, tanto de cargas, quanto de pessoas, de veículos com motores a gás natural no continente europeu. Os principais elementos que motivaram o estudo foram: (i) os benefícios econômicos de motores a gás natural, com menores custos de operação, (ii) redução gradual da poluição atmosférica e sonora, (iii) grandes reservas de gás natural em países europeus, (iv) aumento do fluxo de veículos entre diferentes países do continente europeu, (v) progresso tecnológico dos motores a gás natural, (vi) expansão e melhoria da rede de abastecimento de gás natural, e (vii) aumento da integração geopolítica entre os países da região (UNECE, 2003).

O estudo analisou três possíveis rotas: Rota 1: Moscou (Rússia), Minsk (Bielorrússia), Varsóvia (Polônia) e Berlim (Alemanha); Rota 2: Berlim (Alemanha) e Roma (Itália); e Rota 3: Helsinque (Finlândia), São Petersburgo (Rússia) e Moscou (Rússia) (UNECE, 2003). Como

resultado, para que essas rotas pudessem atender o fluxo de veículos a gás natural, os pesquisadores concluíram que haveria a necessidade de instalar mais 20 unidades de abastecimento para a Rota 1, 16 para a Rota 2 e 16 para a Rota 3, totalizando 52 novas unidades. Além disso, o estudo também concluiu que seriam necessários um total de 15,9 milhões de euros em investimentos para que essa infraestrutura adicional de abastecimento fosse instalada (UNECE, 2003). Por fim, foi criado um mapa para cada rota indicando os trechos do trajeto com maior necessidade de instalação de postos de abastecimento para que o caminho pudesse ser atendido. A Figura 5 mostra o mapa elaborado para a Rota 1 – mapas similares também foram elaborados para as Rotas 2 e 3 – no qual é possível observar os postos de abastecimento já existentes na época e os pontos de instalação de novos postos para o atendimento da rota.

Figura 5 – Mapa do resultado final do estudo “Blue Corridor Project” para a Rota 1: Moscou (Rússia), Minsk (Bielorrússia), Varsóvia (Polônia) e Berlim (Alemanha).



Fonte: UNECE (2003).

Em junho de 2012, a Comissão Econômica para a Europa das Nações Unidas (UNECE), juntamente com a União Internacional do Gás (IGU), publicou o relatório “Natural Gas for Vehicles (NGV)”, com o objetivo de atualizar as informações do uso do gás natural veicular no mundo. Na época, o relatório apontou que o crescimento de veículos a gás natural havia aumentado cerca de 12 vezes desde o ano 2000, passando de 1,2 milhões para 14,5 milhões de

veículos em 2012. Os grandes responsáveis por esse aumento no período foram os países do continente asiático: Paquistão, Iran, Índia e China (IGU; UNECE, 2012).

Com relação à América Latina, o relatório concentrou esforços em atualizar um estudo sobre corredores azuis realizado pelo Grupo de Economia da Energia da Universidade Federal do Rio de Janeiro em março de 2005. Baseado nos moldes do estudo europeu (UNECE, 2003), os autores avaliaram a oportunidade de implementação de um corredor azul em uma rota localizada na parte sul do continente latino-americano, abrangendo as regiões sul do Brasil, Uruguai, norte da Argentina e Chile. Essa área de abrangência possui a rede de gás natural mais bem servida do continente devido à alta concentração de centros urbanos, econômicos e industriais. A Figura 6 mostra o mapa da rota analisada pelo estudo, onde também é possível verificar a importante conexão estratégica entre os oceanos Atlântico e Pacífico (ALMEIDA *et al.*, 2005; IGU; UNECE, 2012).

Figura 6 – Mapa do estudo de oportunidade de implementação de corredor azul na parte sul do continente latino-americano.



Fonte: ALMEIDA *et al.* (2005) e IGU; UNECE, (2012).

Os principais critérios levados em consideração pelo estudo para a seleção da rota latino-americana foram: (i) a disponibilidade de acesso à rede de gás natural da área, (ii) a importância da rota para a integração entre os centros econômicos e industriais da região e (iii) a alta intensidade de tráfego de veículos. Os autores estimaram a necessidade de instalação de 34 postos de abastecimento ao longo da rota para que a mesma pudesse atender os veículos a gás natural, considerando uma distância entre cada posto de aproximadamente 200 km. Além disso,

verificou-se também que 4 desses postos não poderiam usufruir do acesso à rede de gás já existente, tendo que ser abastecidos por meio de caminhões (IGU; UNECE, 2012).

No Brasil, Mouette *et al.* (2019) analisaram a possibilidade de implementação de corredores azuis no estado de São Paulo, onde os autores verificaram os impactos ambientais e econômicos da substituição do diesel pelo gás natural liquefeito (GNL) para o uso em veículos de carga pesada. Dois cenários de análise foram desenvolvidos. O primeiro (i) considerou apenas a implementação de corredores azuis nas áreas já servidas por gasodutos (considerando o atendimento de cerca de 145.662 viagens por dia, ou 73% do fluxo total). Já o segundo (ii) considerou todo o estado (atendendo cerca de 199.519 viagens por dia). Também foram consideradas duas opções para a distribuição do GNL até os postos de abastecimento: (i) liquefação centralizada com distribuição por caminhões e (ii) liquefação localizada (sem a necessidade do uso de caminhões).

Para a determinação do posicionamento dos postos de abastecimento, as seguintes premissas foram utilizadas por Mouette *et al.* (2019): (i) os postos devem ser instalados ao longo das rodovias principais do estado, a fim de minimizar os riscos relacionados à demanda, (ii) os postos devem ser instalados o mais próximo possível da rede de gás natural existente de modo a garantir a oferta, sem desprezar a premissa *i*, (iii) a localização dos postos deve garantir o escoamento da produção das regiões mais longínquas do estado até o porto de Santos, respeitando as premissas *i* e *ii*, (iv) a capital do estado deve ter instalado ao menos um posto de abastecimento, e (v) a cobertura da área do estado deve ser maximizada com no máximo um único abastecimento, respeitando as premissas *i* e *iv*, de forma que os veículos possam realizar viagens de ida e volta entre os pontos de origem e destino. A Figura 7 mostra o mapa desenvolvido por Mouette *et al.* (2019) com as rotas dos corredores azuis, tanto para o cenário limitado às regiões com presença de gasodutos, quanto para o cenário considerando o atendimento a todo o estado de São Paulo.

Figura 7 – Corredores azuis para o estado de São Paulo, considerando os cenários 1 (linha cheia, limitado às regiões com presença de gasodutos) e 2 (linha pontilhada, para todo o estado, independente da presença de gasodutos).



Fonte: MOUETTE *et al.* (2019).

Os autores concluem que a implementação da infraestrutura para os corredores azuis depende da viabilidade de investimentos e recomendam a inicialização das operações com a liquefação centralizada do GNL e distribuição por caminhões até os postos de abastecimento. Em seguida, após a consolidação da demanda, os autores recomendam que a liquefação do GNL seja realizada mais próxima dos consumidores finais de forma a reduzir o transporte do mesmo por caminhões e atender os objetivos ambientais da proposta (redução de poluentes e gases de efeito estufa) (MOUETTE *et al.*, 2019).

Outro estudo, realizado pela consultoria Consulgás (2022) para a Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado de São Paulo (ARSESP), analisou a possibilidade de implantação de corredores azuis na Região Sudeste do Brasil, composta pelos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo. Através dos dados disponíveis pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), os autores avaliaram o tráfego de veículos pesados de 35 rodovias, sendo 25 federais e 10 estaduais, para identificar os maiores fluxos da região. Também foram avaliadas a jornada de trabalho e horários de descanso dos motoristas de caminhão e frequência e tempo de abastecimento dos veículos.

O estudo desenvolveu três cenários de ação para a implantação dos corredores azuis na Região Sudeste, divididas em ondas. A primeira onda, a partir de 2023, aproveitaria a infraestrutura de postos com disponibilidade de Gás Natural Comprimido (GNC) já existente

da região. A segunda onda, a partir de 2025, localizaria postos de abastecimento em pontos estratégicos que ainda não possuem disponibilidade de GNC. Por fim, a terceira onda, a partir de 2030, localizaria postos de abastecimento de GNC nos locais remanescentes, após a totalidade de cobertura dos pontos estratégicos. Foram consideradas as autonomias de 500 km e 800 km para os veículos movidos a GNC e GNL, respectivamente (CONSULGÁS, 2022).

Os autores concluem que, tecnicamente, os caminhões movidos a gás natural possuem uma autonomia relevante para as necessidades do mercado. Os veículos movidos a GNC possuem uma vantagem com relação aos movidos a GNL devido à disponibilidade já existente de postos com GNC na região de interesse e à menor quantidade de investimentos na adaptação de postos que ainda não possuem essa alternativa de abastecimento (CONSULGÁS, 2022).

Atualmente, com a expansão da instalação de postos de abastecimento para veículos a gás natural ao longo de algumas rodovias brasileiras, alguns corredores azuis começam a surgir no cenário nacional. Em 2021, por exemplo, a maior distribuidora de gás natural no Brasil – Comgás – inaugurou um ponto de abastecimento no município de Taboão da Serra (SP), fazendo com que a rodovia Regis Bittencourt (rota São Paulo-Curitiba) fosse capaz de atender veículos pesados de carga a gás natural. A rota, portanto, possui postos de abastecimento com GNV em Curitiba (PR), Colombo (PR), Taboão da Serra (SP) e São Paulo (SP), com a maior distância entre eles de 375 km (percurso inferior à autonomia média dos caminhões a GNV: cerca de 400 a 500 km). Para a averiguação da viabilidade da rota, diversos veículos pesados, com até 18 toneladas de carga cada, conseguiram realizar uma viagem de ida e volta na rota São Paulo-Curitiba (EXAME, 2021).

Além disso, no estado do Paraná, a Companhia Paranaense de Gás – Compagas – vem desenvolvendo o projeto Corredor Azul que visa a implementação de postos de abastecimento para veículos pesados de cargas movidos a gás natural ao longo das principais rodovias do estado. Com alguns postos já instalados na região metropolitana de Curitiba (PR), a companhia pretende expandir com a implementação de um posto de abastecimento na cidade de Ponta Grossa (PR), a aproximadamente 117 km a oeste de Curitiba (PR), além de aproveitar o potencial de produção de biometano na região norte do estado para o desenvolvimento de um polo de abastecimento local (COMPAGAS, 2022).

Apesar da pequena expansão recente da infraestrutura de abastecimento de veículos a gás natural no Brasil, as rodovias nacionais ainda carecem de recursos que viabilizem a adoção desses veículos de forma ampla e disseminada no país. Visando o desenvolvimento dessa infraestrutura de forma otimizada, este trabalho incluirá em seu processo metodológico conceitos da pesquisa operacional, descritos pela seção 2.2.

2.2. Pesquisa operacional

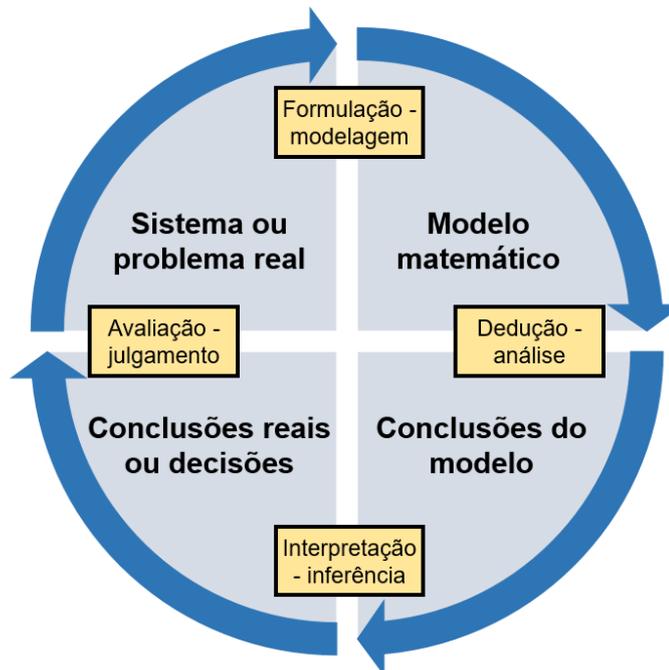
A pesquisa operacional é uma área da ciência que utiliza métodos matemáticos, estatísticos e computacionais para auxiliar na resolução de problemas complexos e na gestão de recursos escassos, abrangendo recursos humanos, materiais e financeiros (MARINS, 2011). Basicamente, a pesquisa operacional procura uma abordagem científica para tomada de decisões visando determinar a forma mais eficiente e otimizada de se projetar e operar um sistema, ao mesmo tempo em que se atende as restrições dos problemas e as limitações dos recursos disponíveis (ARENALES *et al.*, 2011).

O termo “pesquisa operacional” adotado no Brasil é uma tradução direta do inglês para *operational research*. Essa denominação, no entanto, é comumente criticada pois pode parecer limitada à simples análise de operações, não revelando a abrangência dessa área de estudo (ARENALES *et al.*, 2011). Outras denominações também são utilizadas, como: “ciências da administração” (HILLIER; LIEBERMAN, 2006), “análise de decisões” ou “ciência e tecnologia de decisão”, por exemplo, mas o termo “pesquisa operacional” ainda é o mais difundido no âmbito das engenharias, administração, ciências da computação, economia e estatística (ARENALES *et al.*, 2011).

Assim como são geralmente conduzidas as pesquisas científicas, a pesquisa operacional inicia o seu processo observando e formulando cuidadosamente o problema a ser resolvido em um determinado sistema, incluindo a coleta dos dados mais relevantes. Em seguida, há a construção de um modelo, tipicamente matemático, visando representar a essência do problema real. Surge então a hipótese de que esse modelo inspirado na realidade a represente de forma suficientemente precisa, englobando as suas características mais pertinentes. Por fim, o modelo é testado e a hipótese é verificada, podendo o mesmo sofrer modificações conforme necessário (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

A Figura 8 representa esse processo de análise e solução de um problema através da pesquisa operacional. O ciclo de análise inicia-se pela avaliação do sistema ou problema real e, em seguida, pela formulação ou modelagem matemática que caracterize essa realidade. Após a construção do modelo matemático, são verificadas as soluções que esse modelo está propondo como ótimas. Dessa forma, cabe aos pesquisadores avaliarem se a solução do modelo é coerente (ou viável) para o sistema real. Caso a solução não seja satisfatória, o modelo é revisto, reiniciando o ciclo. É importante salientar que a responsabilidade desse processo é dos pesquisadores (ou tomadores de decisões), e não das soluções geradas pelo modelo. Ou seja, os modelos não substituem tomadores de decisões (ARENALES *et al.*, 2011).

Figura 8 – Processo de modelagem.



Fonte: Adaptado de Arenales *et al.* (2011).

Os modelos desenvolvidos na pesquisa operacional buscam encontrar uma solução ótima, ou seja, a melhor solução entre as soluções possíveis para o problema considerado. Ressalta-se que é possível haver mais de uma única solução ótima, ou várias soluções consideradas como “as melhores”. O objetivo não é simplesmente melhorar a situação atual, mas identificar o melhor caminho a seguir (HILLIER; LIEBERMAN, 2006). Em alguns casos, no entanto, a limitação de recursos do mundo real não permite que a melhor solução possível seja aplicada, fazendo com que os pesquisadores considerem outras soluções possíveis, porém “menos ótimas” (FONTANA, 2015).

2.2.1. Histórico de desenvolvimento da pesquisa operacional

As origens da pesquisa operacional podem ser atribuídas às iniciativas de uma abordagem científica dos problemas pela gestão das organizações décadas atrás. No entanto, a denominação “pesquisa operacional” é geralmente atribuída às atividades militares no período antecedente à Segunda Guerra Mundial. Havia uma necessidade de designação dos recursos escassos para as diversas operações militares de forma otimizada. Nesse sentido, os exércitos britânico e norte-americano convocaram alguns cientistas da época para aplicar soluções de pesquisa operacional no desenvolvimento de táticas e estratégias de guerra (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

Em outubro de 1937, o historiador militar Basil H. Liddell Hart já apontava a necessidade de uma análise científica das operações do exército britânico. O historiador escreveu que as decisões estratégicas e táticas eram não científicas e que os problemas operacionais militares deveriam ser investigados por um corpo de oficiais que pudessem se dedicar integralmente à análise dessas questões. Além disso, esse grupo de oficiais deveria ser composto pelos melhores intelectuais do exército na época e com experiência prática de guerra (AIR MINISTRY, 1963).

Em outubro de 1941, com grande influência de Hart, foi inaugurada na Inglaterra a primeira Seção de Pesquisa Operacional do Comando da Força Aérea de Combate. Foram estabelecidas diferentes equipes para solucionar os problemas das operações de guerra, como controle de artilharia antiaérea, dimensionamento de comboios de frota, manutenção de aeronaves e melhoria na probabilidade de destruição de submarinos (AIR MINISTRY, 1963; ARENALES *et al.*, 2011).

A partir de então, a aplicação da pesquisa operacional nas diversas áreas, tanto militares, quanto civis, evoluiu rapidamente na Inglaterra e nos Estados Unidos. Em 1947, coordenado pelo economista Marshall Wood e pelo matemático George Dantzig, foi implementado pelo governo americano o projeto SCOOP (*Scientific Computation of Optimal Programs*), com o objetivo de apoiar as operações da força aérea americana. Nesse projeto, Dantzig desenvolveu o método simplex de resolução de problemas de programação linear, que se baseavam em trabalhos anteriores do matemático russo Leonid Kantorovich (ARENALES *et al.*, 2011).

A partir da década de 1950, a pesquisa operacional foi ganhando espaço nos setores públicos e privados da economia, sendo aplicada para a otimização de problemas em diversas áreas. Alguns exemplos dessas aplicações envolviam coleta de lixo, transporte, produção e logística de empresas em diversas indústrias, bancos e seguradoras, hospitais, bibliotecas, energia, esportes, sistema judiciário, turismo, agências de governo, etc. Na década de 1960, a pesquisa operacional também começou a ser estudada nos cursos de pós-graduação de grandes universidades, entrando para o currículo de graduação a partir dos anos 1970 (ARENALES *et al.*, 2011).

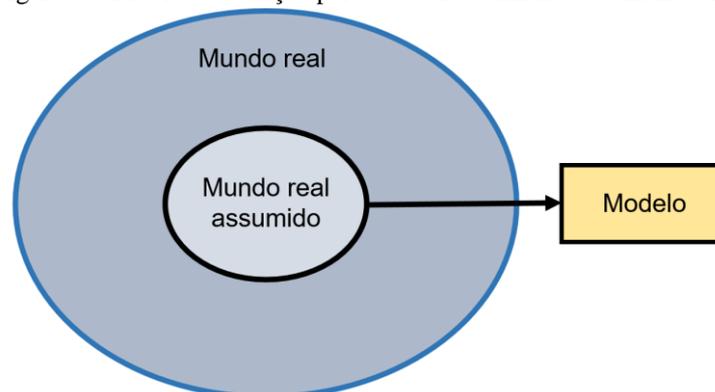
No Brasil, o primeiro grupo de pesquisa operacional em uma empresa foi estabelecido na Petrobrás, em 1965. No ano seguinte foi realizado o “Primeiro Seminário de PO no Brasil”, promovido pela Petrobrás, na cidade do Rio de Janeiro. Nessa mesma época, também foi fundada a Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (SOBRAPO), onde se reuniram os interessados pelo desenvolvimento e uso das técnicas de pesquisa operacional e otimização de sistemas no Brasil (MARINS, 2011). Atualmente, a pesquisa operacional está amplamente

difundida no processo gerencial de grandes empresas, setores públicos e universidades, auxiliando os pesquisadores nas tomadas de decisões e otimizando operações cada vez mais complexas.

2.2.2. Modelagem matemática

A pesquisa operacional utiliza a modelagem matemática de forma a representar um problema real, definindo as variáveis que melhor descrevem o comportamento do sistema em questão (ARENALES *et al.*, 2011). Ou seja, os modelos matemáticos são criados por meio de uma abstração do mundo real, de maneira que as funções matemáticas desenvolvidas buscarão representar o comportamento do sistema real em um mundo real assumido pela equipe de pesquisa operacional (TAHA, 2007). A Figura 9 abaixo representa esse nível de abstração durante a construção de um modelo de pesquisa operacional.

Figura 9 – Nível de abstração para o desenvolvimento de um modelo.



Fonte: Adaptado de TAHA (2007).

A qualidade de um modelo matemático será influenciada pela capacidade de criação, imaginação e abstração dos integrantes da equipe de pesquisa operacional. A utilização de modelos não só permite a análise do problema modelado, como também a possibilidade de aplicar diversas alternativas de melhorias de um sistema sem interrompê-lo (MARINS, 2011).

De forma geral, os modelos matemáticos de otimização linear são estruturados da seguinte forma: (i) definição das *variáveis de decisão*; (ii) definição das relações e limitações a que estão sujeitas essas *variáveis de decisão* (chamado de *restrições*); e (iii) elaboração da *função objetivo* (que é colocada em termos das *variáveis de decisão*) (MARINS, 2011). Há, portanto, uma **forma padrão** para a representação de problemas de otimização, conforme as equações (1), (2) e (3) abaixo (ARENALES *et al.*, 2011):

$$\text{Minimizar } f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (1)$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \quad (2)$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \quad (3)$$

A equação (1) representa a *função objetivo* do problema, uma equação linear que deve ser minimizada para que seja encontrada a solução ótima. A equação (2) representa as *restrições* do problema, definidas por m equações lineares que restringem os valores das n *variáveis de decisão*. Já a equação (3) complementa as restrições do problema, representando a condição de não-negatividade de todas as n *variáveis de decisão*. Todos os problemas de otimização linear podem ser escritos nessa forma padrão representada pelas equações (1), (2) e (3) (ARENALES *et al.*, 2011).

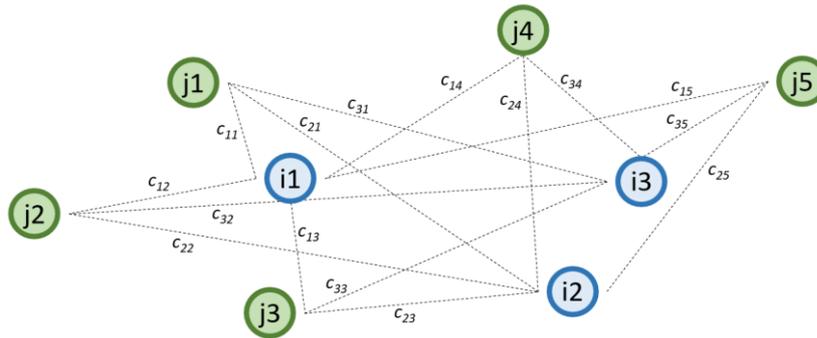
2.2.3. Modelos de localização e alocação de recursos

Localização de facilidades⁴ e alocação de recursos podem ser problemas logísticos críticos para o planejamento estratégico de grandes instituições ou empresas. Localização de centros de saúde, estações de bombeiros, fábricas, postos de abastecimento e centros de distribuição são alguns exemplos típicos onde busca-se otimizar a disposição de instalações para o atendimento da maior demanda possível ou para o menor custo das atividades. Em alguns contextos, a modelagem do problema aborda, de forma simultânea, as decisões de (i) localização de facilidades e a (ii) designação de clientes a elas (ARENALES *et al.*, 2011).

Um dos problemas mais tradicionais de pesquisa operacional para a localização de facilidades e designação de clientes é o das P-medianas, ou ***P-median facility location problem***, em inglês. O modelo matemático do problema consiste em realizar a localização de p facilidades e designar os clientes do sistema a cada uma delas, de forma que a soma das distâncias (ou dos custos logísticos) entre clientes e facilidades seja minimizada (ARENALES *et al.*, 2011). A Figura 10 mostra uma representação gráfica de um exemplo de problema de P-medianas, onde há a possibilidade de localizar até 3 facilidades ($i = 1, 2, 3$, sendo, portanto, $m = 3$) para o atendimento de 5 clientes ($j = 1, 2, 3, 4, 5$, sendo, portanto, $n = 5$) conforme os custos de designação indicados por c_{ij} .

⁴ O termo “facilidades” foi utilizado por Arenales *et al.* (2011) como tradução para o termo em inglês: “*facilities*”, que, para este trabalho, também pode ser traduzido como “instalações”, “estabelecimentos” ou “postos de abastecimento”.

Figura 10 – Representação gráfica para um problema de P-medianas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A função objetivo de um problema tradicional de P-medianas é encontrada abaixo, por meio da equação (4), onde busca-se minimizar a soma dos custos das designações de clientes j a facilidades i . As equações (5), (6), (7) e (8) são as restrições do problema. A equação (5) garante que cada cliente j seja atendido por uma única facilidade i . A equação (6) garante que todos os clientes sejam atendidos apenas por facilidades abertas no local i , impossibilitando a designação dos mesmos a facilidades fechadas. A equação (7) indica que foram abertas exatamente p facilidades (valor definido antes da resolução do problema). Por fim, a equação (8) mostra que as variáveis de decisão x_{ij} e y_i assumem valores binários. A variável x_{ij} assume o valor 1 se uma facilidade i atenderá um cliente j , e 0, caso contrário. Já a variável y_i assume o valor de 1 caso uma facilidade seja aberta em i , e 0, caso contrário (ARENALLES *et al.*, 2011, p. 201). Variações de problemas desse tipo podem exigir a adição de variáveis ou de restrições de forma a extrair o melhor modelo para a situação real, como a minimização das distâncias entre facilidades e pontos de demanda, por exemplo. O Quadro 2 define os elementos das equações (4), (5), (6), (7) e (8).

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \forall j \in J \quad (5)$$

$$x_{ij} \leq y_i, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = p \quad (7)$$

$$x, y \in \{0,1\} \quad (8)$$

Quadro 2 – Definição dos elementos do modelo *P-Median*.

Parâmetro	Definição
j	Pontos (ou nós) onde são localizados os clientes, sendo $j = 1, \dots, n$.
i	Pontos (ou nós) onde há a possibilidade de localização de facilidades, sendo $i = 1, \dots, m$.
J	Conjunto de pontos (ou nós) j que representam os clientes.
I	Conjunto de pontos (ou nós) i que representam os locais candidatos à localização de facilidades.
q_j	Demanda do cliente j .
d_{ij}	Distância do cliente j à facilidade localizada em i .
c_{ij}	Custo para atender a demanda q_j através da facilidade localizada em i .
f_i	Custo fixo de instalação de uma facilidade em i .
Q_i	Capacidade máxima de atendimento de uma facilidade instalada em i .
p	Número de facilidades a serem localizadas.
y_i	É uma variável de decisão . Valor 1 se a facilidade é aberta em i , 0 caso contrário.
x_{ij}	É uma variável de decisão . Valor 1 se a facilidade i atende o cliente j , 0 caso contrário.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Arenales *et al.* (2011).

Church e ReVelle (1974) desenvolveram o *maximal coverage location problem* (MCLP), uma variação do problema das P-medianas que busca atender o máximo de demanda possível de forma que as distâncias (ou os tempos de deslocamento) entre pontos de demanda e facilidades não ultrapassem um determinado limite – considerando um número limitado de facilidades. A função objetivo do modelo MCLP busca maximizar a população atendida pelas facilidades instaladas, conforme expresso pela equação (9). As equações (10), (11) e (12) são as restrições do problema. A restrição expressa pela equação (10) introduz um novo elemento N_i , que corresponde ao conjunto de facilidades j elegíveis para o atendimento da demanda em i , ou seja, que estejam a uma distância d_{ij} menor que um determinado limite S . A equação (11) indica que foram abertas exatamente p facilidades (valor definido antes da resolução do problema). Por fim, a equação (12) mostra que as variáveis de decisão x_j e y_i assumem valores binários, sendo x_j igual a 1 se uma facilidade é alocada em j , e 0, caso contrário, e y_i igual a 1 se o ponto de demanda i é atendido por uma facilidade dentro do limite de distância S , e 0, caso contrário. O Quadro 3 – Definição dos elementos do modelo MCLP define os elementos das equações (9), (10), (11) e (12).

$$\text{Maximizar } z = \sum_{i \in I} a_i y_i \quad (9)$$

$$\sum_{i \in N_i} x_j \geq y_i, \forall i \in I, N_i = \{j \in J \mid d_{ij} \leq S\} \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (11)$$

$$x_j, y_i \in \{0,1\} \quad (12)$$

Quadro 3 – Definição dos elementos do modelo MCLP.

Parâmetro	Definição
i	Pontos (ou nós) onde são localizadas as demandas, sendo $i = 1, \dots, n$.
j	Pontos (ou nós) onde há a possibilidade de localização de facilidades, sendo $j = 1, \dots, m$.
I	Conjunto de pontos (ou nós) i que representam as demandas.
J	Conjunto de pontos (ou nós) j que representam os locais candidatos à localização de facilidades.
d_{ij}	A distância mais curta entre a demanda i e o ponto j
N_i	Conjunto de facilidades j elegíveis para o atendimento da demanda em i (ou seja, $d_{ij} \leq S$).
p	Número de facilidades a serem instaladas.
a_i	População atendida no ponto (ou nó) de demanda i .
x_j	É uma variável de decisão . Valor 1 se é alocada uma facilidade em j , 0 caso contrário.
y_i	É uma variável de decisão . Valor 1 se a demanda i é atendida por uma facilidade j dentro do limite S , 0 caso contrário.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Church e ReVelle (1974).

Os exemplos acima traduzem a realidade dos problemas expressando pontos (ou nós) de demanda, atribuindo diferentes valores a esses pontos que quantificam a demanda em cada um deles. Entretanto, Goodchild e Noronha (1987) reconhecem que, em muitos casos, a localização e a alocação de facilidades em uma rede devem atender fluxos de demanda e não pontos. Lojas de conveniência, postos de gasolina e caixas eletrônicos são alguns exemplos em que há a necessidade de atendimento da demanda em formato de fluxo. Hodgson (1990) e Berman, Larson e Fouska (1992) desenvolveram, de forma independente, um modelo de localização e alocação de facilidades de forma que as mesmas atendessem uma demanda baseada em fluxo, denominado por Hodgson (1990) de *flow-capturing location model* (FCLM) (HODGSON *et al.*, 1996).

O FCLM busca encontrar os pontos (ou nós) de uma rede que “captura” o maior fluxo possível de demanda. Hodgson (1990) evidencia dois importantes aspectos de um fluxo: (i) a sua intensidade entre pontos de origem e destino e (ii) a sua trajetória. Para a simplificação do modelo, o autor considera que todo par de origem e destino (OD) irá percorrer o caminho mais curto, possuindo assim, uma única trajetória. Dessa forma, a unidade básica de demanda nos problemas de FCLM serão os pares de OD, com valor igual ao seu fluxo (HODGSON, 1990).

Convencionalmente, a origem de uma trajetória i é denominada de O_i , o seu destino j , de D_j , e o fluxo entre OD, de f_{ij} . Nesse sentido, um par ij de OD representa uma única demanda e nunca será separado. Hodgson (1990), portanto, simplifica o modelo introduzindo uma variável q no lugar de ij . Assim, q indica um par OD, e Q é o conjunto de todos os pares OD. Enquanto i e j varia de 1 até n , q varia de 1 até n^2 . Entretanto, o autor trata os fluxos como simétricos e apenas entre nós diferentes (ou seja, um nó de origem nunca terá como destino ele mesmo). Dessa forma, q varia de 1 até $n(n-1)/2$ (HODGSON, 1990).

As equações (13), (14), (15) e (16) expressam o modelo desenvolvido por Hodgson (1990). A equação (13) é a função objetivo do problema, onde busca-se maximizar a “captura” dos fluxos. As equações (14), (15) e (16) são as restrições do problema. A equação (14) indica que um par de OD q apenas será considerado “capturado” se o mesmo tiver uma facilidade instalada em algum ponto ao longo de seu trajeto. A equação (15) indica que foram abertas exatamente p facilidades (valor definido antes da resolução do problema). Por fim, a equação (16) mostra que as variáveis de decisão x_k e y_q assumem valores binários, sendo x_k igual 1 se há uma facilidade instalada em uma localização k , e 0, caso contrário, e y_q igual a 1 se um fluxo f_q é “capturado”, e 0, caso contrário. O Quadro 4 define os elementos das equações (13), (14), (15) e (16).

$$\text{Maximizar } z = \sum_{q \in Q} f_q y_q \quad (13)$$

$$\sum_{k \in N_q} x_k \geq y_q, \forall q \in Q \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K} x_k = p \quad (15)$$

$$x_k, y_q \in \{0,1\} \quad (16)$$

Quadro 4 – Definição dos elementos do modelo FCLM.

Parâmetro	Definição
q	Indica um par de origem e destino (OD)
Q	Conjunto de pares de origem e destino.
f_q	Fluxo de um par q de origem e destino.
k	Indica uma localização potencial para a instalação de uma facilidade.
K	Conjunto de todas as potenciais localizações para a instalação de uma facilidade.
p	Número de facilidades a serem localizadas.
N_q	Conjunto de pontos (ou nós) capazes de “capturar” o fluxo f_q (ou seja, o conjunto de nós na trajetória q entre uma origem i e um destino j).
x_k	É uma variável de decisão . Valor 1 se é alocada uma facilidade em k , 0 caso contrário.
y_q	É uma variável de decisão . Valor 1 se o fluxo f_q é “capturado”, 0 caso contrário.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Hodgson (1990).

Na prática, Hodgson *et al.* (1996) utilizaram o FCLM para maximizar a captura de veículos em pontos de atendimento na cidade de Edmonton, Canadá, utilizando dados de fluxo do período da manhã⁵. Recentemente, outros autores também se basearam no FCLM para determinar a posição otimizada de pontos de atendimento em uma determinada região geográfica. Crönert e Minner (2021), por exemplo, se inspiraram no FCLM para determinar o

⁵ Mais detalhes sobre este estudo podem ser encontrados nos estudos de caso da seção de 2.3.

posicionamento ótimo de postos de abastecimento de veículos movidos a hidrogênio na cidade de Munique, Alemanha. Xu, Li e Fan (2023), também trabalhando com veículos movidos a hidrogênio, se inspiraram no FCLM para determinar os pontos ótimos de instalação de postos de abastecimento na cidade de Anaheim, no estado da Califórnia, Estados Unidos.

O FCLM é um dos primeiros modelos que tratam a demanda como um fluxo e não como um ponto, considerando o atendimento da mesma quando há, no mínimo, uma facilidade instalada entre os pontos de OD de uma trajetória. Entretanto, em algumas situações, um número maior de facilidades precisa ser instalado ao longo de um trajeto para que um fluxo de demanda seja atendido. É o caso dos postos de abastecimento ao longo das rodovias, onde os veículos que os utilizam precisam ser abastecidos diversas vezes para que consigam completar suas viagens. Nesse sentido, um modelo que otimize a localização de postos de abastecimento ao longo de grandes trajetos precisa levar em consideração a autonomia dos veículos (KUBY; LIM, 2005).

Kuby e Lim (2005) desenvolveram o *flow-refueling location model* (FRLM), modelo similar ao FCLM, porém levando em consideração justamente a autonomia dos veículos. Assim, um fluxo apenas será considerado como “capturado” se o mesmo tiver ao longo de sua trajetória q a quantidade mínima de postos de abastecimento necessária para que o mesmo consiga percorrer todo o caminho entre OD. No FRLM é introduzida uma nova variável h , que representa todas as combinações de localizações de postos de abastecimento ao longo de um caminho q que o torna possível de realiza-lo por meio dos veículos considerados no modelo (KUBY; LIM, 2005).

A função objetivo do FRLM (a mesma que a do FCLM e expressa pela equação (17) abaixo) busca maximizar o fluxo total que pode ser abastecido por p facilidades. As equações (18), (19), (20) e (21) são as restrições do problema. A equação (18) estabelece que para um fluxo f_q ser “capturado”, é preciso que ao menos uma combinação de facilidades h seja aberta para que o caminho q seja atendido. A equação (19) assegura que todas as facilidades presentes na combinação h estejam abertas, sendo v_h igual a 0, caso contrário. A equação (20) indica que foram abertas exatamente p facilidades (valor definido antes da resolução do problema). Por fim, a equação (21) mostra que as variáveis x_k , v_h e y_q são binárias. A variável x_k é igual a 1 se há uma facilidade instalada em uma localização k , e 0, caso contrário, e a variável y_q é igual a 1 se um fluxo f_q é “capturado”, e 0, caso contrário (KUBY; LIM, 2005). O Quadro 5 define os elementos das equações (17), (18), (19), (20) e (21).

$$\text{Maximizar } z = \sum_{q \in Q} f_q y_q \quad (17)$$

$$\sum_{h \in H} b_{qh} v_h \geq y_q, \forall q \in Q \quad (18)$$

$$a_{hk} x_k \geq v_h, \forall h \in H; k \mid a_{hk} = 1 \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} x_k = p \quad (20)$$

$$x_k, v_h, y_q \in \{0,1\}, \forall k, h, q \quad (21)$$

Quadro 5 – Definição dos elementos do modelo FRLM.

Parâmetro	Definição
q	Indica um par de origem e destino (OD) (também o menor caminho entre origem e destino).
Q	Conjunto de pares de origem e destino.
f_q	Fluxo de um par q de origem e destino.
k	Indica uma localização potencial para a instalação de uma facilidade.
K	Conjunto de todas as potenciais localizações para a instalação de uma facilidade.
p	Número de facilidades a serem localizadas.
h	Indica a combinação de facilidades capazes de abastecer o caminho q .
H	Conjunto das combinações h 's de facilidades capazes de abastecer os caminhos q 's
a_{hk}	Valor 1 se a facilidade k faz parte da combinação h , 0 caso contrário. ⁶
b_{qh}	Valor 1 se a combinação de facilidades h consegue abastecer o caminho q , 0 caso contrário. ⁷
v_h	Valor 1 se todas as facilidades na combinação h estão abertas, 0 caso contrário.
x_k	É uma variável de decisão . Valor 1 se é alocada uma facilidade em k , 0 caso contrário.
y_q	É uma variável de decisão . Valor 1 se o fluxo f_q é “capturado”, 0 caso contrário.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Kuby e Lim (2005).

Na prática, Kuby *et al.* (2009), visando atender os objetivos de desenvolvimento da indústria do hidrogênio no estado da Flórida, Estados Unidos, utilizaram o FRLM para determinar a localização e alocação ótima de postos de abastecimento para veículos movidos a hidrogênio nas rodovias do mesmo estado⁸. Recentemente, outros autores também trabalharam com o FRLM, como Piene e Peratinos (2022) que investigaram as localizações ótimas para a instalação de postos de abastecimento para veículos elétricos no sistema rodoviário da Noruega, utilizando o FRLM como modelo de otimização. Erdoğan *et al.* (2022) utilizaram como base o

⁶ Parâmetro adicionado ao modelo por Kuby e Lim (2005) visando auxiliar a resolução do problema por meio de um software específico utilizado pelos autores. Outras abordagens de solução podem demandar variáveis diferentes.

⁷ Parâmetro adicionado ao modelo por Kuby e Lim (2005) visando auxiliar a resolução do problema por meio de um software específico utilizado pelos autores. Outras abordagens de solução podem demandar variáveis diferentes.

⁸ Mais detalhes sobre este estudo podem ser encontrados nos estudos de caso da seção de 2.3.

FRLM para o desenvolvimento de uma rede otimizada de abastecimento (também para veículos elétricos) ao longo das principais rodovias do estado de Maryland, Estados Unidos.

Um modelo similar ao FRLM foi desenvolvido por Kim e Kuby (2012) para o atendimento da demanda de abastecimento de veículos ao longo de suas trajetórias entre OD: o *deviation-flow refueling location model* (DFRLM). Entretanto, diferentemente do FRLM, o DFRLM considera em seu modelo desvios dos caminhos originais entre origens e destinos que os motoristas estariam dispostos a percorrer para abastecerem seus veículos, desobrigando a instalação das facilidades apenas ao longo do caminho mais curto entre OD. Para a aplicação do DFRLM, pressupõe-se um valor de desvio máximo que os motoristas estariam dispostos a percorrer para o abastecimento de seus veículos. Algumas abordagens adotam diferentes funções onde a demanda atendida diminui conforme a distância do desvio entre o caminho principal e o posto de abastecimento aumenta (KIM; KUBY, 2012).

2.2.4. Métodos de solução

Após o processo de modelagem de um problema de pesquisa operacional, deseja-se aplicar a técnica de resolução que seja capaz de encontrar a melhor solução possível. Muitas vezes, o problema já é modelado de forma que seja possível a aplicação de uma determinada técnica de resolução já conhecida pelos pesquisadores. Problemas de alta complexidade podem demandar um alto custo para serem solucionados (muitas vezes relacionados com o elevado esforço computacional). Nesses casos, os pesquisadores podem abdicar da busca pela melhor solução possível, ou seja, uma solução “ótima global”, e se contentam com uma solução boa, ou seja, soluções “ótimas locais”. As técnicas mais comuns para a resolução de problemas de pesquisa operacional são: (i) programação linear, (ii) programação linear inteira, (iii) programação não linear, (iv) programação inteira mista e (v) abordagem heurística (FONTANA, 2015).

2.3. Estudos de caso

Modelos de otimização aplicados além dos exemplos hipotéticos, utilizados para o desenvolvimento da teoria, podem apresentar grandes desafios devido à complexidade dos fluxos de demanda e dos inúmeros nós de redes do mundo real (HODGSON *et al.*, 1996). As seções 2.3.1 e 2.3.2 apresentam dois estudos de caso em que os autores utilizaram dados de demanda em forma de fluxo. O primeiro utilizou o FCLM para maximizar a captura de veículos

na cidade de Edmonton, Canadá, enquanto o segundo utilizou o FRLM para atender as rotas de veículos movidos a hidrogênio no estado da Flórida, Estados Unidos.

2.3.1. Estudo de caso 1: FCLM em Edmonton, Canadá

Hodgson *et al.* (1996) aplicaram os conceitos do FCLM para maximizar a captura dos fluxos de veículos na cidade de Edmonton, Canadá. Na época, a cidade tinha aproximadamente 700 km² de área, com 103 km de rodovias expressas, 729 km de vias arteriais, 451 km de vias coletoras e 1644 km de vias locais, totalizando 2.927 km de vias. Muitas delas, incluindo duas pontes, tinham sentido único, tornando os fluxos assimétricos e elevando a complexidade do problema.

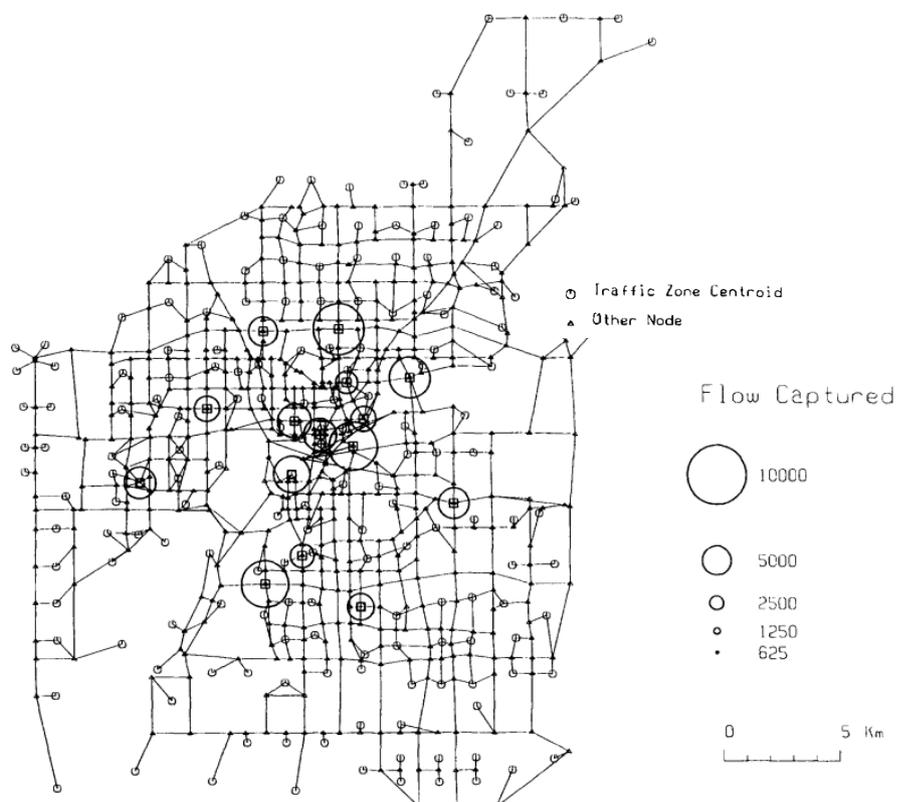
Os autores tiveram acesso aos dados de 327 zonas de tráfego da área metropolitana de Edmonton, mas limitaram suas análises a apenas 177 zonas municipais devido à complexidade da rede. Para a operacionalização do problema, cada zona foi agregada por um centroide. Assim, o volume de tráfego, o tempo de viagem e a distância entre cada zona foram estimadas a partir de seus centroides, que são conectados por meio da rede de transportes representados por arcos (tratados, portanto, como um sistema de rede convencional).

Um sistema com um número de centroides $n = 177$ produz um total de 31.152 possibilidades de pares OD ($n^2 - n$). Entretanto, os autores verificaram que muitos desses pares possuíam um valor de fluxo igual a zero, podendo ser removidos, restando 23.350 pares OD para a análise. Algumas simplificações relacionadas com a dinâmica de um sistema de fluxo urbano real tiveram que ser feitas para que os recursos computacionais utilizados pelos autores pudessem encontrar soluções para o problema principal. Entre elas, está a premissa de sempre assumir o caminho mais curto para um par de OD. Contudo, Hodgson *et al.* (1996) reconhecem que, muitas vezes em um cenário urbano, os usuários de uma rede de tráfego congestionada podem procurar rotas alternativas ao caminho mais curto, visando encontrar caminhos mais rápidos, mesmo que mais longos.

A Figura 11 mostra a solução ótima obtida por Hodgson *et al.* (1996) para a instalação de $p = 15$ facilidades, atendendo 68,9% do fluxo total. Os tamanhos dos círculos representam o volume de fluxo capturado após a instalação da facilidade em determinado nó, conforme indicado pela legenda da imagem. Os autores concluem que o uso do FCLM para o estudo de caso em Edmonton apresentou bons resultados pois a estruturação do problema real respeitou as premissas às quais o modelo foi concebido. Entretanto, algumas questões importantes do mundo real podem restringir a aplicabilidade do modelo, como o fato de um fluxo urbano de

veículos não seguirem caminhos únicos ou a falta de disponibilidade para a instalação de facilidades em interseções (ou nós). Assim, Hodgson *et al.* (1996) sugerem o aprofundamento do modelo e propõem que mais estudos de caso com dados reais sejam realizados.

Figura 11 – Solução ótima do modelo FCLM.



Fonte: Hodgson *et al.* (1996).

2.3.2. Estudo de caso 2: FRLM na Flórida, Estados Unidos

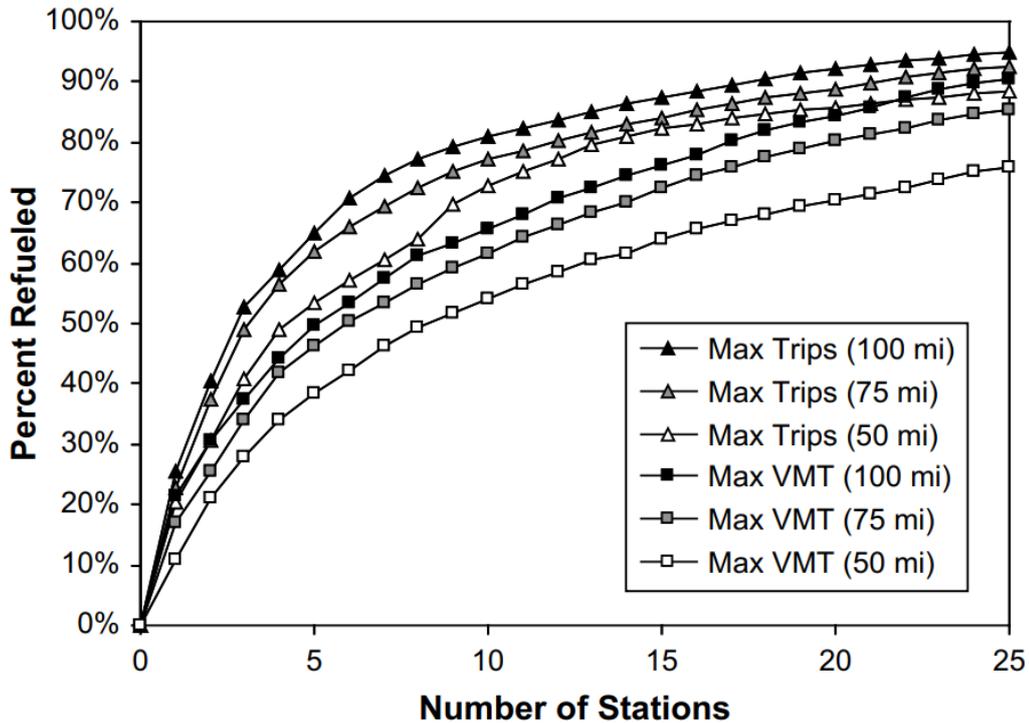
Kuby *et al.* (2009) elaboraram um estudo de localização e alocação de facilidades para o abastecimento de veículos a hidrogênio, visando atender os objetivos de desenvolvimento da indústria do hidrogênio no estado da Flórida, por meio da organização sem fins lucrativos: *Florida Hydrogen Initiative, Inc.* (FHI). O estudo fez parte de um projeto que analisou a viabilidade de implementação de uma empresa de alugueis de carros a hidrogênio situada no Aeroporto Internacional de Orlando.

Em todo o estado da Florida, os autores agregaram 74 pares de OD e avaliaram veículos com autonomies de 50, 75 e 100 milhas⁹. Além disso, também foram analisadas duas funções objetivos: a (i) primeira buscou maximizar o volume de fluxo atendido, enquanto a (ii) segunda buscou maximizar a distância percorrida dos fluxos, privilegiando as viagens mais longas em

⁹ 1 milha equivale a 1,60934 km. Portanto, as autonomies consideradas foram de aproximadamente 80,5 km, 120,7 km e 160,9 km, respectivamente.

detrimento das mais curtas, multiplicando cada viagem do fluxo pela sua distância. Como resultado, pôde-se gerar um gráfico da porcentagem do fluxo atendido em função do número de facilidades p instaladas, da autonomia dos veículos e do tipo da função objetivo, conforme mostrado pela Figura 12. Observa-se que, para $p = 25$, nenhum dos cenários conseguiu atender a totalidade dos fluxos.

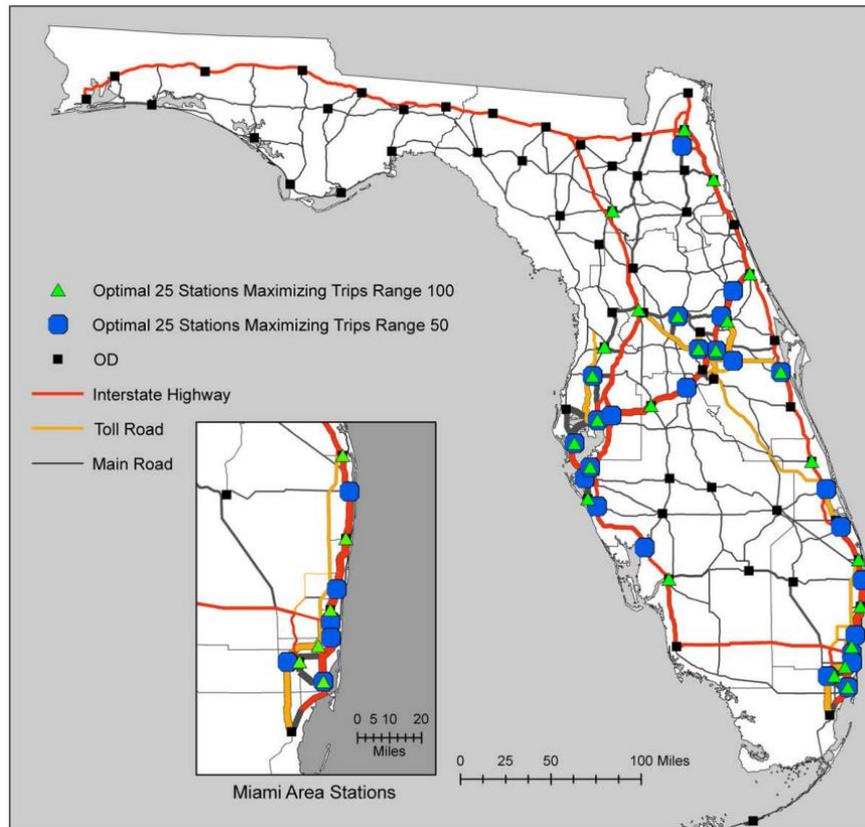
Figura 12 – Porcentagem do fluxo atendido em função do (i) número de facilidades p instaladas, da (ii) autonomia dos veículos e do (iii) tipo de função objetivo.



Fonte: Kuby *et al.* (2009).

O mapa da Figura 13 apresenta o resultado da distribuição ótima de 25 postos de abastecimento de hidrogênio ($p = 25$) no estado da Florida para veículos com autonomia de 50 e 100 milhas, considerando a função objetivo de maximização do fluxo atendido. A espessura das linhas indica o volume do fluxo. Para o cenário com os veículos com 50 milhas de autonomia, observou-se a formação de dois aglomerados de postos localizados nas regiões de maiores fluxos do estado: Miami (região sudeste) e Orlando (região central). Nesse sentido, Kuby *et al.* (2009) apontam a necessidade de instalação de um número maior de postos para que esses dois grandes aglomerados possam se conectar e assim, aumentar o volume de fluxo atendido. Já para os veículos com 100 milhas de autonomia, observou-se uma distribuição mais ampla dos postos de abastecimento possibilitando a captura de um maior volume de fluxo.

Figura 13 – Mapa do estado da Flórida com a localização ótima dos postos de abastecimento para $p = 25$, considerando os veículos com autonomies de 50 e 100 milhas.



Fonte: Kuby *et al.* (2009).

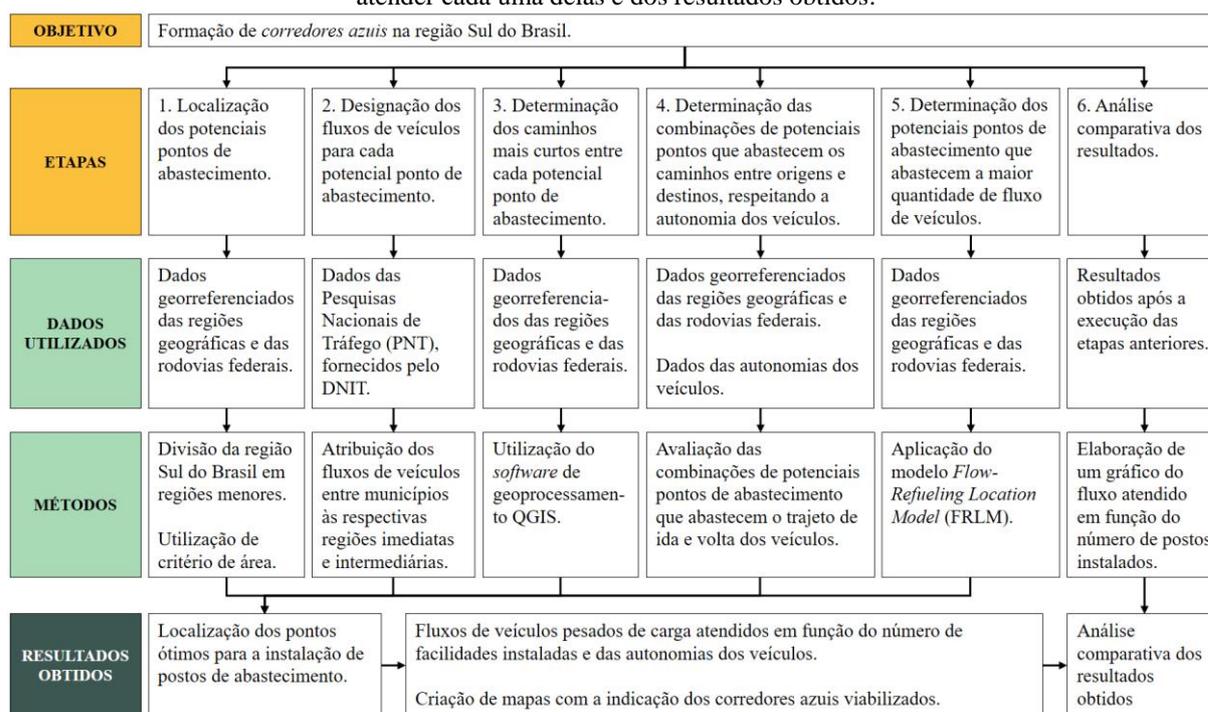
Por meio deste estudo de caso, é possível traçar um paralelo entre o problema enfrentado pelos veículos a hidrogênio no estado da Flórida com o problema dos veículos pesados de carga movidos a gás natural na Região Sul do Brasil: a necessidade de uma infraestrutura de postos de abastecimento capaz de suprir a demanda dos fluxos de veículos entre seus pontos de origem e destino. Os estudos de caso apresentados nesta seção e na anterior serviram de inspiração para o desenvolvimento deste trabalho, principalmente pelo racional metodológico empregado, pelo processo de adequação do sistema real às premissas do modelo de otimização e pela forma de representação dos resultados obtidos. Dessa forma, a seção 3 abordará os materiais e os métodos utilizados neste estudo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução deste trabalho, seis etapas de desenvolvimento foram criadas visando adequar as condições reais do sistema às premissas do modelo FRLM e permitir que, ao final, fosse realizada a análise dos resultados obtidos. As etapas foram divididas da seguinte forma: (i) localização dos potenciais pontos de abastecimento ao longo das rodovias da Região Sul do Brasil, (ii) designação dos fluxos de veículos para cada potencial ponto de abastecimento, (iii) determinação dos caminhos mais curtos entre cada potencial ponto de abastecimento por meio do *software* de georreferenciamento QGIS, (iv) determinação das combinações dos potenciais pontos que abastecem os veículos em seus caminhos entre origem e destino, respeitando suas autonomias, (v) determinação dos potenciais pontos de abastecimento que, com um posto instalado, viabilizam o atendimento do maior fluxo de veículos possível na região e (vi) construção de um gráfico do fluxo atendido em função do número de facilidades instaladas e das autonomias dos veículos para a realização de uma análise comparativa dos resultados.

A Figura 14 mostra um resumo esquemático do objetivo, das etapas de desenvolvimento supracitadas, dos dados e ferramentas utilizadas ao longo da execução de cada etapa e os resultados obtidos. Mais detalhes sobre os dados utilizados e de cada etapa de desenvolvimento podem ser encontrados nas seções 3.1 e 3.2, respectivamente.

Figura 14 – Resumo esquemático das etapas de desenvolvimento deste trabalho, dos materiais e métodos para atender cada uma delas e dos resultados obtidos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1. Dados utilizados

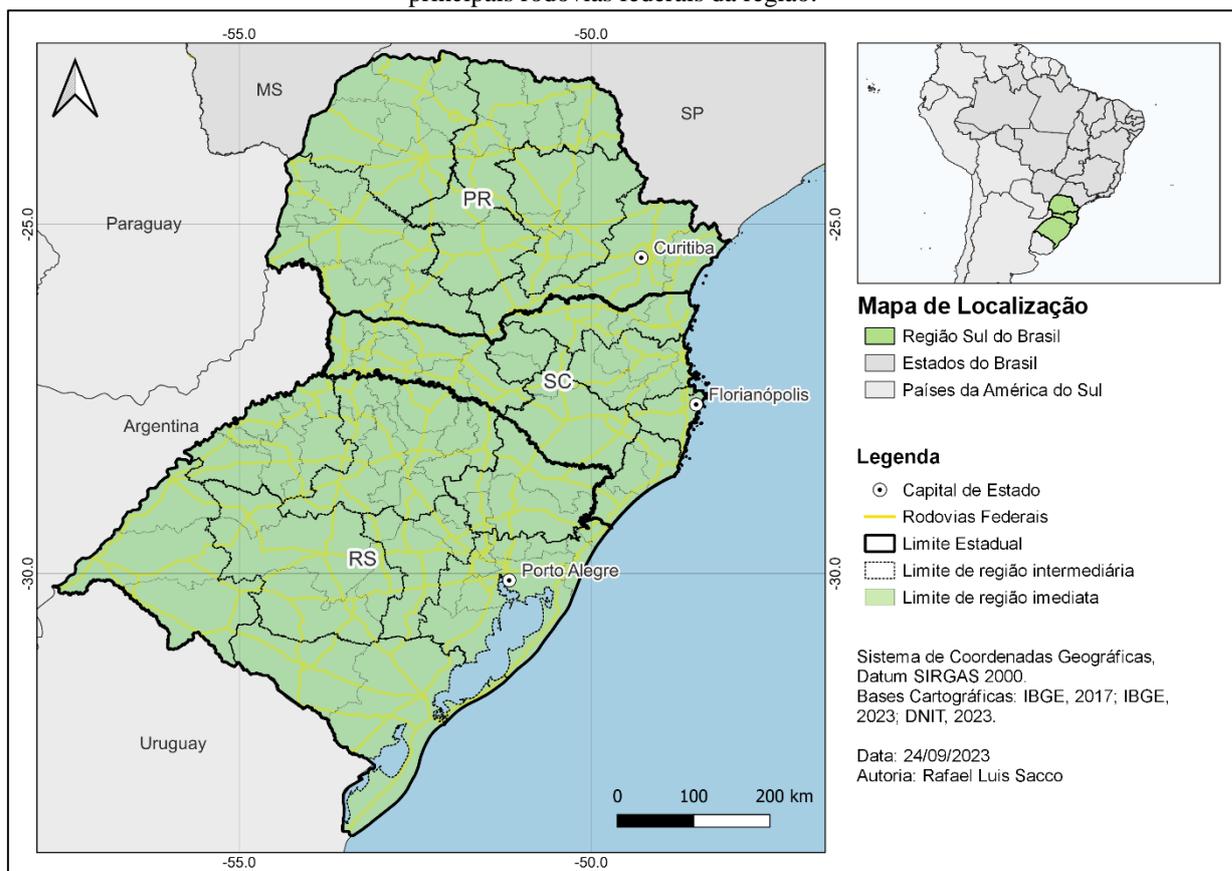
Esta seção buscou atender parte do objetivo específico 3 deste trabalho conforme descrito pelo Quadro 1. Compuseram o conjunto de dados utilizados: dados georreferenciados da Região Sul do Brasil e das rodovias federais brasileiras, dados de fluxo de veículos pesados de carga da região e dados de autonomia dos veículos pesados de carga movidos a gás natural, conforme detalhado pelas subseções a seguir.

3.1.1. Dados georreferenciados

Para a elaboração dos mapas deste trabalho, foram utilizados arquivos em formato *shapefile*. Os arquivos “lml_capital_p.shp” e “lml_unidade_federacao_a.shp”, obtidos pelo portal do IBGE (2023), localizam as capitais dos estados e os limites estaduais, respectivamente. Os arquivos “RG2017_regioesgeograficas2017.shp”, “RG2017_rgi.shp” e “RG2017_rgint.shp”, também obtidos pelo portal do IBGE (2017), localizam os municípios, as regiões imediatas e as regiões intermediárias do Brasil, respectivamente. Regiões imediatas são estruturadas pelo IBGE levando em consideração a proximidade dos municípios com centros urbanos que permitem a satisfação das necessidades imediatas das populações, como: trabalho, compras de bens de consumo e prestação de serviços públicos. Já as regiões intermediárias correspondem a uma escala intermediária entre os limites estaduais e as regiões imediatas (IBGE, 2017).

A localização dos traçados das principais rodovias brasileiras foi obtida através do repositório digital do DNIT (2023a), por meio do arquivo “SNV_202301B.shp”. Neste trabalho, foram considerados os traçados das seguintes rodovias: BR-101, BR-116, BR-153, BR-158, BR-163, BR-272, BR-277, BR-280, BR-282, BR-285, BR-287, BR-290, BR-293, BR-369, BR-376, BR-386, BR-392, BR-466, BR-470, BR-472, BR-475 e BR-476, totalizando 22 rodovias federais, com aproximadamente 15 mil km de extensão pertencentes à Região Sul do Brasil. O mapa da Figura 15 mostra as regiões imediatas e intermediárias dos três estados da Região Sul do Brasil e as principais rodovias consideradas neste estudo.

Figura 15 – Mapa da Região Sul do Brasil, com suas respectivas regiões imediatas e intermediárias e as principais rodovias federais da região.



Fonte: Elaborado pelo autor através do *software QGIS*.

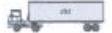
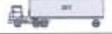
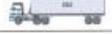
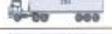
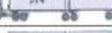
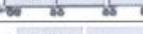
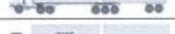
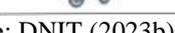
3.1.2. Origem e destino dos veículos pesados de carga

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), por meio das Pesquisas Nacionais de Tráfego (PNT) dos anos de 2016 e 2017, entrevistou 1.384.330 usuários das rodovias de todo o Brasil para a construção de uma matriz de origem e destino (OD), agrupando-os em três categorias veiculares: Leves, Pesados I e Pesados II. As entrevistas foram realizadas em quatro períodos: entre os dias 2 e 8 de julho de 2016, entre os dias 19 e 25 de novembro de 2016, entre os dias 1 e 7 de julho de 2017 e entre os dias 18 e 24 de novembro de 2017, ocorrendo sempre por 7 dias consecutivos. Do total das entrevistas realizadas, 190.727 delas tiveram como origem e destino dos veículos a Região Sul do Brasil, sendo 85,7% desse valor referente a veículos Leves e, apenas 14,3%, referente a veículos Pesados (soma dos veículos Pesados I e Pesados II) (DNIT, 2023b).

A Figura 16 mostra os tipos de veículos correspondentes a cada categoria adotada pela pesquisa, conforme a Nota Técnica N° 004/2019/DE disponibilizada pelo DNIT (2023b). Este trabalho irá utilizar os dados da matriz de OD das categorias Pesados I e Pesados II. Apesar dos

ônibus estarem incluídos na categoria Pesados I, ela também engloba os caminhões leves e alguns tipos de caminhões reboques e semirreboques, não podendo, portanto, ser desconsiderada da análise. Assim, uma pequena parte (4,9%) dos fluxos de veículos pesados considerados neste trabalho refere-se aos ônibus, sendo o restante (95,1%) referente aos caminhões leves, reboques, semirreboques e semirreboques especiais. Para efeitos de simplificação, considerou-se como não significativa a possível distorção que a inclusão dos ônibus nos dados de fluxo regional de veículos pesados de carga pudesse causar no resultado final.

Figura 16 – Classificação veicular adotada pela pesquisa de OD do PNT dos anos de 2016 e 2017.

Tipo de veículo		Descrição	Categoria da matriz OD
Veículos leves	P1		Leves
	P2		Leves
	P3		Leves
Ônibus	O1		Pesados I
	O2		Pesados I
	O3		Pesados I
Caminhões leves	C1		Pesados I
	C2		Pesados I
	C3		Pesados I
	C4		Pesados I
	C5		-
Caminhões reboques	R1		Pesados II
	R2		Pesados I
	R3		Pesados II
	R4		Pesados II
	R5		Pesados II
	R6		Pesados II
Caminhões semirreboques	S1		Pesados I
	S2		Pesados I
	S3		Pesados II
	S4		Pesados I
	S5		Pesados II
	S6		Pesados II
Caminhões semirreboques especiais	SE1		Pesados II
	SE2		Pesados II
	SE3		Pesados II
	SE4		Pesados II
	SE5		Pesados II
Moto	M		Leves

Fonte: DNIT (2023b).

3.1.3. Autonomia dos veículos

De modo geral, um litro de óleo diesel, 5 litros de GNC ou 1,8 litros de GNL proporcionam a mesma autonomia para um caminhão. Nesse sentido, o uso do GNC seria mais recomendado para contextos urbanos, com reabastecimento durante a noite, enquanto o uso do GNL, por possuir uma densidade energética maior, para viagens de médias e longas distâncias (IGU; UNECE, 2012). Com relação ao tempo de abastecimento dos caminhões, não há uma diferença significativa entre as duas formas do gás natural, levando aproximadamente 10 minutos para o GNC e 7 minutos para o GNL (TOTAL, 2019; VAN GRINSVEN et al., 2021).

Segundo as especificações dos caminhões movidos a gás natural da Scania, principal fabricante desses veículos no Brasil, modelos que rodam com GNC possuem uma autonomia de até 500 km, enquanto modelos que rodam com GNL podem oferecer uma autonomia de até 1.200 km (SCANIA BRASIL, 2020). De forma similar, a fabricante sueca Volvo informa em seu catálogo uma autonomia de até 400 km para caminhões movidos a GNC e de até 1.000 km para caminhões movidos a GNL (VOLVO TRUCKS, 2023). A fabricante francesa Renault também informa que seus caminhões movidos a GNC possuem uma autonomia de até 400 km (RENAULT TRUCKS, 2021). Um estudo de caso realizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos também observou em sua análise autônias similares: entre 275 e 325 milhas (aproximadamente 442,6 km e 523,0 km¹⁰) para caminhões movidos a GNC e entre 550 e 650 milhas (aproximadamente 885,1 km e 1.046,1 km) para caminhões movidos a GNL (LAUGHLIN; BURNHAM, 2016).

Nesse sentido, serão consideradas nas análises deste trabalho três diferentes autônias para os veículos pesados de carga movidos a gás natural: 400, 600 e 800 km. Entende-se que a autonomia de 400 km represente os veículos pesados de carga movidos a GNC, enquanto as autônias de 600 e 800 km representem veículos pesados de carga movidos a GNL, conforme resumido pelo Quadro 6.

Quadro 6 – Autonomia dos veículos e situação representada.

Autonomia	Situação representada
400 km	Representação de veículos pesados de carga movidos a GNC.
600 km	Representação de veículos pesados de carga movidos a GNC no futuro, conforme a tecnologia se desenvolve. Ou representação de veículos pesados de carga movidos a GNL com baixo e médio desempenho.
800 km	Representação de veículos pesados de carga movidos a GNL.

Fonte: Elaborado pelo autor.

¹⁰ Considerou-se 1 milha equivalente a 1,60934 km.

3.2. Metodologia

Afim de adequar a realidade ao modelo de pesquisa operacional, algumas premissas foram adotadas baseadas nos trabalhos de Hodgson (1990) e Kuby e Lim (2005). São elas:

- A rede rodoviária será considerada como simétrica. Ou seja, todos os caminhos de ida também serão de volta, com a mesma distância e trajetória, porém, com direções opostas.
- Toda a trajetória percorrida pelos veículos será o caminho mais curto entre os pontos de origem e destino (OD). Segundo um levantamento realizado pelo DNIT, a maior parte dos caminhoneiros (32,9%) utilizam a rota com a trajetória mais curta, seguido pela rota definida pelas empresas (19,3%) e pela rota com o caminho mais rápido (15,6%). Os outros 32,3% definem suas trajetórias por outros motivos (DNIT, 2023b).
- Não será considerada a possibilidade de desvio do caminho mais curto entre os pontos de origem e destino (OD).
- A localização de pontos de abastecimento em um caminho não irá influenciar o valor de seu fluxo.
- Para um caminho ser considerado atendido, os veículos deverão ser capazes de realizar uma viagem de ida e volta.
- O consumo de combustível dos veículos será considerado linearmente proporcional à distância percorrida, sem levar em consideração as condições das rodovias, relevo e eventuais congestionamentos.
- A instalação de postos de abastecimento será permitida apenas entre os cruzamentos das rodovias federais, conforme descrito na seção 3.1.1.
- No início do trajeto, se não houver uma facilidade instalada no ponto de origem, considerar-se-á apenas meio tanque cheio para o veículo.
- No final do trajeto, se não houver uma facilidade instalada no ponto de destino, o veículo deverá conter no mínimo meio tanque cheio.

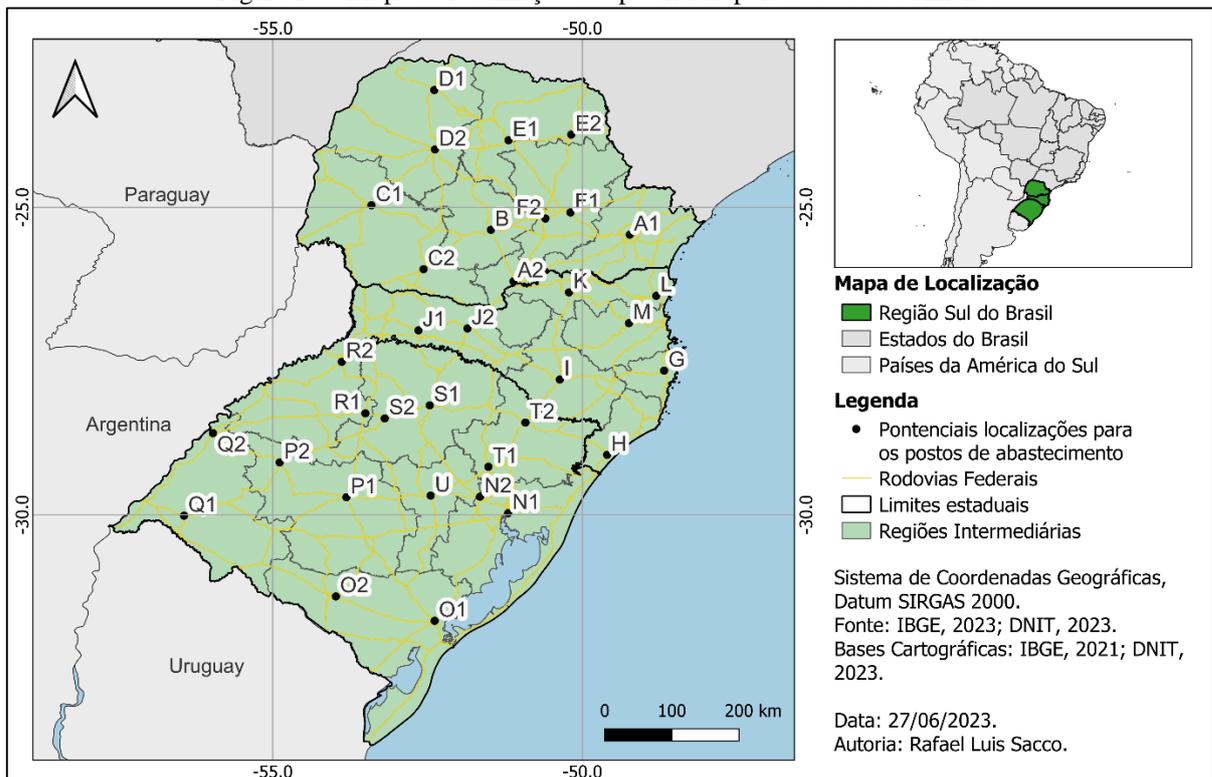
As subseções a seguir descrevem os métodos utilizados para o desenvolvimento de cada etapa deste trabalho.

3.2.1. Etapa 1: localização dos potenciais pontos de abastecimento

Para a localização dos potenciais pontos de abastecimento, dividiu-se o território da Região Sul do Brasil conforme suas regiões imediatas e intermediárias. Dessa forma, um único potencial ponto de abastecimento foi localizado em regiões intermediárias com áreas inferiores a 20.000 km², enquanto dois potenciais pontos de abastecimento foram localizados em regiões intermediárias superiores a 20.000 km². Os pontos foram nomeados por letras, sendo cada letra representante de uma região intermediária. Os algarismos “1” e “2” foram adicionados aos nomes de pontos localizados em regiões intermediárias que receberam dois potenciais pontos de abastecimento.

O mapa da Figura 17 mostra a localização dos potenciais pontos de abastecimento ao longo da Região Sul do Brasil. Os pontos foram localizados nas interseções entre rodovias federais, seguindo uma das premissas do modelo de Kuby e Lim (2005). Para as regiões intermediárias maiores que 20.000 km², as mesmas foram divididas conforme suas regiões imediatas. Assim, dois grupos de regiões imediatas foram criados para cada região intermediária acima de 20.000 km². O critério de definição para se classificar uma região imediata como pertencente ao grupo com algarismo “1” ou “2” foi a proximidade com os cruzamentos entre rodovias federais pertencentes à região intermediária em questão.

Figura 17 – Mapa de localização dos potenciais pontos de abastecimento.



Fonte: Elaborado pelo autor através do software QGIS.

A região intermediária de Blumenau (SC), por exemplo, possui uma área de 15.286 km². Mesmo sendo composta por seis regiões imediatas (Blumenau, Itajaí, Brusque, Rio do Sul, Ibirama-Presidente Getúlio e Ituporanga), apenas um único potencial ponto de abastecimento foi localizado na região intermediária de Blumenau devido a sua área inferior a 20.000 km². Tal ponto pode ser encontrado no mapa da Figura 17 representado pela letra “M”. Em contrapartida, a região intermediária de Chapecó (SC), por exemplo, possui uma área de 24.603 km². Seguindo o racional adotado neste trabalho, por ser uma região intermediária com área superior a 20.000 km², dois potenciais pontos de abastecimento foram localizados na região, dividindo-a em duas. As regiões imediatas de Chapecó, São Miguel do Oeste, Maravilha e São Lourenço do Oeste foram designadas para a localização do potencial ponto de abastecimento “J1”, enquanto as regiões imediatas de Joaçaba-Herval d'Oeste, Concórdia e Xanxerê foram designadas para a localização do potencial ponto de abastecimento “J2”, conforme indicado no mapa da Figura 17.

O racional adotado nos exemplos do parágrafo anterior foi utilizado para todas as outras regiões intermediárias pertencentes à Região Sul do Brasil, com exceção das regiões intermediárias de Joinville (14.771 km² de área) e Caçador (6.203 km² de área), no estado de Santa Catarina. Conforme mostrado pelo mapa da Figura 17, a região intermediária de Caçador não possui um cruzamento entre as rodovias federais consideradas neste estudo. Por esse motivo, para a localização de um potencial ponto de abastecimento referente a essa região, considerou-se um cruzamento de rodovias federais na região intermediária de Joinville, indicado pela letra “K” no mapa da Figura 17. Assim, a região intermediária de Joinville contempla dois potenciais pontos de abastecimento, indicados pelos pontos “K” e “L”. O apêndice A mostra as regiões intermediárias e imediatas correspondentes a cada potencial ponto de abastecimento localizado no mapa da Figura 17. Ao todo, foram localizados 34 potenciais pontos de abastecimento.

3.2.2. Etapa 2: designação dos fluxos de veículos em cada potencial ponto de abastecimento

Foram utilizados os dados das Pesquisas Nacionais de Tráfego (PNT) para a designação do fluxo de veículos em cada potencial ponto de abastecimento. Os dados fornecidos pelo DNIT foram estruturados em uma matriz de origem e destino por município. Nesse sentido, o fluxo de veículos de cada município foi atribuído à sua respectiva região imediata. Como cada potencial ponto de abastecimento tem associado a si uma região imediata, a atribuição de um

fluxo de veículos em cada região imediata possibilitou a atribuição de um fluxo de veículos em cada potencial ponto de abastecimento.

Utilizando a região imediata de Brusque (SC) como exemplo, que teve atribuída para si os fluxos de veículos dos municípios que a compõe (São João Batista, Nova Trento, Major Gercino, Guabiruba, Canelinha, Brusque e Botuverá), a região intermediária de Blumenau teve, da mesma forma, atribuída para si os fluxos das regiões imediatas que a compõe (Blumenau, Itajaí, Brusque, Rio do Sul, Ibirama-Presidente Getúlio e Ituporanga). Assim, atribuiu-se ao potencial ponto de abastecimento “M” a origem das viagens de veículos que partem de algum município pertencente à região intermediária de Blumenau (SC) ou o destino de veículos que chegam a algum município dessa região. O mesmo racional foi aplicado a todos os outros potenciais pontos de abastecimento.

Entre os pontos localizados no mapa da Figura 17, foram encontrados 318 pares de origem e destino que apresentaram uma ou mais viagens informadas pelos entrevistados nas PNT. Ao todo, foram registradas 6.299 viagens com origem e destino na Região Sul do Brasil. O par de origem e destino “A1-L”, representando as regiões de Curitiba e Joinville, respectivamente, apresentou o maior fluxo de veículos entre os dados levantados. Com 404 entrevistados declarando os pontos “A1” e “L” como origem ou destino de suas viagens, o fluxo da rota representou 6,41% do total regional. O Quadro 7 apresenta os dez maiores fluxos entre os pares de origem e destino após a atribuição dos mesmos aos pontos localizados no mapa da Figura 17.

Quadro 7 – Dez maiores fluxos entre os pares de origem e destino.

Origem	Região intermediária correspondente	Destino	Região intermediária correspondente	Total de viagens declaradas na rota	Porcentagem do fluxo da rota em comparação com o total regional
A1	Curitiba	L	Joinville	404	6,41%
J1	Chapecó	A1	Curitiba	254	4,03%
M	Blumenau	A1	Curitiba	190	3,02%
A1	Curitiba	S1	Passo Fundo	187	2,97%
H	Criciúma	N1	Porto Alegre	185	2,94%
J2	Chapecó	A1	Curitiba	179	2,84%
C2	Cascavel	J1	Chapecó	155	2,46%
A1	Curitiba	N1	Porto Alegre	155	2,46%
M	Blumenau	N1	Porto Alegre	140	2,22%
C1	Cascavel	J1	Chapecó	137	2,17%
T1	Caxias do Sul	A1	Curitiba	113	1,79%
G	Florianópolis	N1	Porto Alegre	106	1,68%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a execução deste trabalho, foram considerados os cem maiores fluxos de veículos entre os pares de origem e destino. O apêndice B mostra a relação completa dos fluxos considerados. Levando em conta apenas os cem maiores fluxos, nenhuma viagem foi encontrada para os pontos “E2” e “Q2” do mapa da Figura 17. Com um total de 5.138 viagens registradas, os cem maiores fluxos regionais representam 81,57% do total registrado para a Região Sul do Brasil.

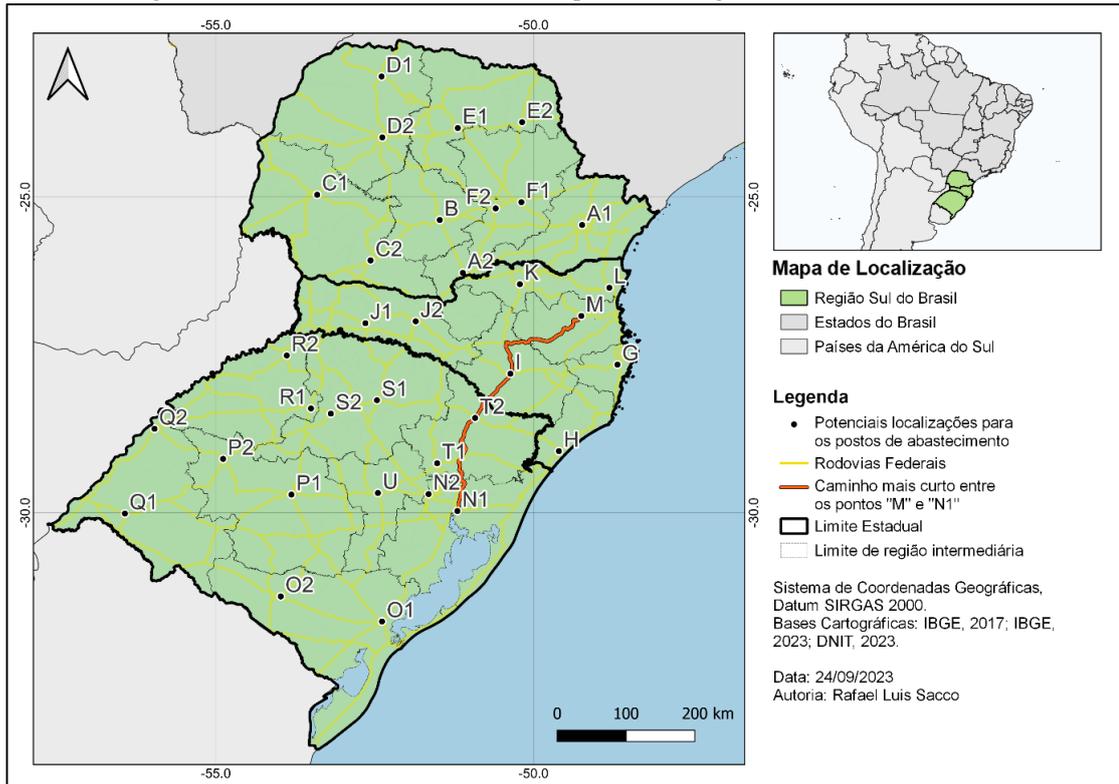
3.2.3. Etapa 3: determinação dos caminhos mais curtos entre pontos de origem e destino

O *software* de geoprocessamento *QGIS* foi utilizado para a determinação dos caminhos mais curtos entre pontos de origem e destino dos fluxos de veículos obtidos conforme descrito na seção 3.2.2. A ferramenta “*Shortest path (point to point)*” do programa, ou em português: *caminho mais curto (de ponto para ponto)*, utilizou as informações geográficas das rodovias federais consideradas neste estudo para determinar o menor traçado entre os potenciais pontos de abastecimento. Dessa forma, também foi possível mapear todos os potenciais pontos de abastecimento pertencentes aos caminhos mais curtos de cada par de origem e destino.

O mapa da Figura 18 mostra um exemplo de determinação do caminho mais curto entre pontos de origem e destino: “M” e “N1”, ou entre as regiões de Blumenau (SC) e Porto Alegre (RS). Observa-se que os potenciais pontos de abastecimento “I” e “T2” também fazem parte do

caminho mais curto obtido pelo programa QGIS. Ou seja, para que os veículos saiam de “M” até “N1” (ou vice-versa), eles passarão pelos pontos “I” e “T2”. O mesmo processo de análise foi realizado para todos os outros pares de origem e destino. O Quadro 8 mostra os potenciais pontos de abastecimento que fazem parte dos caminhos mais curtos dos pares de origem e destino abordados no Quadro 7. O apêndice C mostra a mesma informação, porém para os cem pares de origem e destino considerados neste trabalho.

Figura 18 – Caminho mais curto entre os pontos de origem e destino "M" e "N1".



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 8 – Potenciais pontos de abastecimento pertencentes aos caminhos mais curtos dos pares de origem e destino com os dez maiores fluxos.

ID	Origem	Região intermediária correspondente	Destino	Região intermediária correspondente	Pontos pertencentes ao caminho mais curto
1	A1	Curitiba	L	Joinville	A1-L
2	J1	Chapecó	A1	Curitiba	A1-A2-J2-J1
3	M	Blumenau	A1	Curitiba	A1-L-M
4	A1	Curitiba	S1	Passo Fundo	A1-A2-J2-S1
5	H	Criciúma	N1	Porto Alegre	H-N1
6	J2	Chapecó	A1	Curitiba	A1-A2-J2
7	C2	Cascavel	J1	Chapecó	C2-J1
8	A1	Curitiba	N1	Porto Alegre	A1-K-I-T2-N1
9	M	Blumenau	N1	Porto Alegre	M-I-T2-N1
10	C1	Cascavel	J1	Chapecó	C1-J1

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.4. Etapa 4: determinação das combinações dos potenciais pontos de abastecimento que abastecem o fluxo de veículos em cada caminho

Primeiramente, utilizou-se o *software QGIS* para a determinação da distância horizontal entre todos os potenciais pontos de abastecimento localizados no mapa da Figura 17. A distância horizontal foi calculada pelo *software* respeitando o traçado das rodovias federais consideradas neste estudo. Uma matriz de origem e destino com as distâncias entre cada ponto localizado foi gerada utilizando uma ferramenta disponível para o *QGIS* chamada *QNEAT3 – Qgis Network Analysis Toolbox* e selecionando a opção: *OD Matrix from Layers as Lines (m:n)*.

Em seguida, avaliou-se, para cada par de origem e destino, as combinações dos potenciais pontos de abastecimento que pudessem abastecer o trajeto de ida e volta dos veículos, levando em consideração as premissas da seção 3.2 e as autonomias dos veículos descritas na seção 3.1.3. Assim, fizeram parte da análise os valores de 400, 600 e 800 km para as autonomias dos veículos pesados de carga.

Utilizando o mesmo exemplo abordado no mapa da Figura 18, o Quadro 9 abaixo mostra as combinações dos potenciais pontos de abastecimento que abastecem o fluxo de veículos entre os pontos de origem e destino “M” e “N1”. As distâncias entre os pontos “M-I”, “I-T2” e “T2-N1” são de aproximadamente 226, 102 e 235 km, respectivamente, totalizando uma distância de 562,38 km entre os pontos “M” e “N1”. Assim, um veículo deverá percorrer 1.124,77 km para realizar uma viagem completa de ida e volta no trajeto. Observa-se que, das 15 combinações possíveis, apenas 3 delas conseguem abastecer os veículos com autonomia de 400 km, 9 conseguem abastecer os veículos com autonomia de 600 km e 13 conseguem abastecer os veículos com autonomia de 800 km.

Quadro 9 – Combinações de potenciais pontos de abastecimento que conseguem abastecer o par de origem e destino "M" e "N1", considerando veículos com autonomies de 400 km, 600 km e 800 km.

Par de origem e destino: "M" e "N1". Caminho M, I, T2, N1.			
Postos de abastecimento instalados em:	A combinação de postos instalados possibilita uma viagem de ida e volta dos veículos (baseado em suas autonomies)?		
	400 km	600 km	800 km
M	Não	Não	Não
N1	Não	Não	Não
I	Não	Não	Sim
T2	Não	Não	Sim
I, M	Não	Não	Sim
N1, T2	Não	Não	Sim
T2, M	Não	Sim	Sim
T2, I	Não	Sim	Sim
N1, M	Não	Sim	Sim
N1, I	Não	Sim	Sim
T2, I, M	Não	Sim	Sim
N1, T2, I	Não	Sim	Sim
N1, I, M	Sim	Sim	Sim
N1, T2, M	Sim	Sim	Sim
N1, T2, I, M	Sim	Sim	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

Mesmo considerando os veículos com autonomia de 800 km, não são todas as combinações de alocação de postos de abastecimento que conseguem garantir uma viagem de ida e volta no trajeto do caminho "M-I-T2-N1". A instalação de um único posto em "M", por exemplo, faz com que o veículo fique sem combustível antes de realizar todo o percurso de ida e volta. O mesmo é válido para o caso de se instalar um único posto em "N1", conforme indicado no Quadro acima. O racional foi igualmente aplicado aos outros pares de origem e destino analisados neste estudo.

3.2.5. Etapa 5: maximização dos fluxos de veículos atendidos em função do número de postos de abastecimento alocados na rede

O modelo de otimização *Flow-Refueling Location Model* (FRLM), desenvolvido por Kuby e Lim (2005), foi utilizado nesta etapa do trabalho para se obter a maximização dos fluxos de veículos atendidos em função do número de postos de abastecimento alocados na rede. Para que o modelo fosse aplicado conforme descrito por Kuby e Lim (2005), fez-se necessário o desenvolvimento das seções anteriores 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 e 3.2.4, onde preparou-se os dados para a execução do FRLM. A equação (22) expressa a função objetivo do modelo, enquanto as

equações (23), (24), (25) e (26) expressam as restrições do mesmo. O Quadro 10 define os elementos das equações (22), (23), (24), (25) e (26) aplicados ao contexto deste trabalho.

$$\text{Maximizar } z = \sum_{q \in Q} f_q y_q \quad (22)$$

$$\sum_{h \in H} b_{qh} v_h \geq y_q, \forall q \in Q \quad (23)$$

$$a_{hk} x_k \geq v_h, \forall h \in H; k | a_{hk} = 1 \quad (24)$$

$$\sum_{k \in K} x_k = p \quad (25)$$

$$x_k, v_h, y_q \in \{0,1\}, \forall k, h, q \quad (26)$$

Quadro 10 – Definição dos elementos do modelo FRLM, baseado em Kuby e Lim (2005), aplicados ao contexto deste trabalho.

Parâmetro	Definição dos elementos aplicados ao contexto deste trabalho
q	Indica o caminho mais curto entre um par de origem e destino. Os valores de q variaram de q_1 até q_{100} , indicando os caminhos dos cem maiores fluxos regionais de veículos pesados de carga considerados neste estudo.
Q	Conjunto dos pares de origem e destino. Portanto, $Q = (q_1, q_2, \dots, q_{100})$.
f_q	Fluxo de veículos pesados de carga em um caminho q . Os valores de f_q variaram de f_{q1} até f_{q100} .
k	Indica um potencial ponto de abastecimento localizado no mapa da Figura 17. Os valores de k variaram de k_1 até k_{34} .
K	Conjunto de todos os potenciais pontos de abastecimento localizados no mapa da Figura 17. Portanto, $K = (k_1, k_2, \dots, k_{34})$.
p	Número de postos de abastecimento alocados em K .
h	Indica a combinação dos potenciais pontos de abastecimento capazes de abastecer os caminhos q . Os valores de h foram diretamente influenciados pelas autonomias consideradas (400, 600 e 800 km), variando de h_1 até $h_{(\text{quantidade de combinações } h)}$.
H	Conjunto de todas as combinações h capazes de abastecer os caminhos pertencentes a Q . Portanto, $H = (h_1, h_2, \dots, h_{(\text{quantidade de combinações } h)})$.
a_{hk}	Valor 1 se um potencial ponto de abastecimento k faz parte de uma combinação h , 0 caso contrário. O parâmetro a_{hk} pode ser representado por uma matriz de h linhas e k colunas.
b_{qh}	Valor 1 se a combinação de potenciais pontos de abastecimento h consegue abastecer o caminho q , 0 caso contrário. O parâmetro b_{qh} pode ser representado por uma matriz de q linhas e h colunas.
v_h	Valor 1 se todos os potenciais pontos de abastecimento pertencentes a uma combinação h possuem um posto de abastecimento alocado, 0 caso contrário. Os valores de v_h variaram de v_{h1} até $v_{h(\text{quantidade de combinações } h)}$.
x_k	É uma variável de decisão . Valor 1 se um posto de abastecimento é alocado em k , 0 caso contrário. Os valores de x_k variaram de x_{k1} até x_{k34} .
y_q	É uma variável de decisão . Valor 1 se o fluxo do caminho q é atendido pelos postos alocados, 0 caso contrário. Os valores de y_q variaram de y_{q1} até y_{q100} .

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a execução do modelo de otimização FRLM, foi utilizado o método de solução *evolutionary*, disponível pela ferramenta *Solver* do programa de computador *Excel* da empresa *Microsoft*. O método de solução *evolutionary* faz uso de algoritmos genéticos, modelos de aprendizado heurístico baseados nos princípios da seleção natural, que utilizam procedimentos probabilísticos projetados para trabalhar com problemas complexos (GOLDBERG;

HOLLAND, 1988; GREFENSTETTE, 1993). Modelos de solução heurística, por adotarem métodos empíricos e buscarem uma solução boa (não necessariamente a melhor), acabam sendo frequentemente utilizados para otimizações de problemas complexos do mundo real (MARTÍ; REINELT, 2022).

3.2.6. Etapa 6: análise comparativa dos resultados

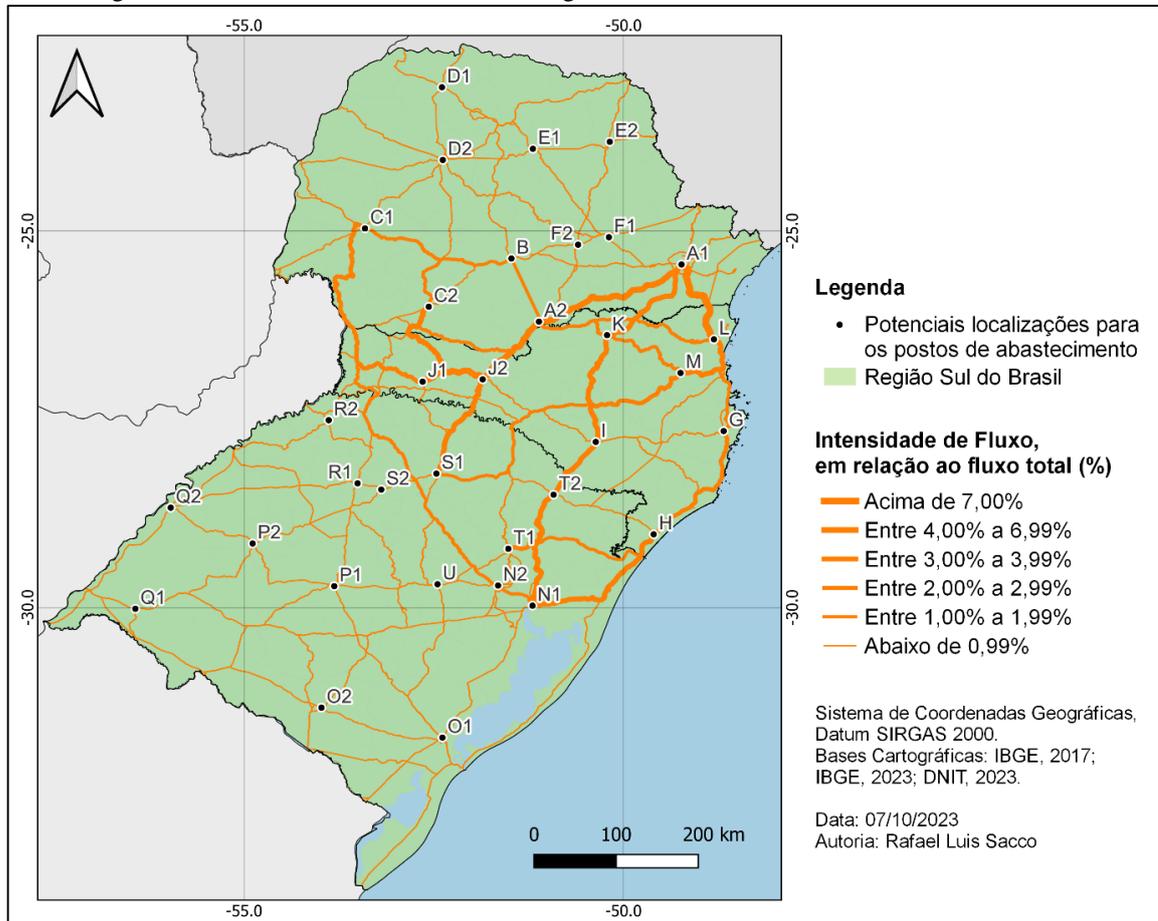
Uma análise comparativa dos resultados foi realizada comparando os resultados dos corredores azuis obtidos conforme a variação das autonomias dos veículos consideradas neste trabalho: 400, 600 e 800 km. Assim, construiu-se um gráfico do fluxo atendido em função do número de postos de abastecimento alocados na rede para cada autonomia.

A seção 4 discorre sobre os resultados obtidos. Alguns mapas foram construídos indicando os corredores azuis ótimos formados.

4. RESULTADOS

Por meio dos dados das Pesquisas Nacionais de Tráfego (PNT) realizadas pelo DNIT, foi possível observar um grande fluxo de veículos pesados de carga entre as cidades de Curitiba, no Paraná, e Joinville, em Santa Catarina, se estendendo até as cidades de Blumenau e Florianópolis. O mapa da Figura 19 mostra os traçados das rodovias federais na Região Sul do Brasil, sendo as espessuras proporcionais ao fluxo de veículos de cada caminho: quanto mais espesso o traçado, maior a intensidade do fluxo. As cidades de Curitiba, Joinville, Blumenau e Florianópolis estão representadas pelos pontos “A1”, “L”, “M” e “G”, respectivamente. Outros grandes fluxos também foram observados entre o oeste catarinense (pontos “J1” e J2”) e o norte gaúcho (próximo à cidade de Passo Fundo, ponto “S1”) até a cidade de Curitiba.

Figura 19 – Rodovias federais e os fluxos regionais de veículos considerados neste trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor através do *software QGIS*.

A rodovia que apresentou o maior fluxo regional entre pontos de origem e destino para o transporte rodoviário de cargas foi a BR-376, entre os pontos “A1” e “L”, seguindo com menor intensidade pelo litoral através da BR-101, e depois pela BR-290, até a cidade de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul (ponto “N1”). As rodovias BR-376, BR-101 e BR-290 conectam as três capitais de estado da Região Sul do Brasil: Curitiba (capital do estado do Paraná),

Florianópolis (capital do estado de Santa Catarina) e Porto Alegre (capital do estado do Rio Grande do Sul).

As rodovias BR-476, BR-153 e BR-282 também apresentaram grande fluxo de veículos pesados de carga entre pontos de origem e destino, conectando o oeste catarinense e o norte gaúcho, polos agropecuários regionais, até a cidade de Curitiba, grande centro urbano com acesso a um dos maiores portos do Brasil, o Porto de Paranaguá. De forma similar, a BR-116 também apresentou grande fluxo no transporte de cargas da região. Sendo o caminho mais curto entre as cidades de Porto Alegre e Curitiba, a BR-116, juntamente com a BR-101, passa pelas zonas mais industrializadas do Sul do Brasil.

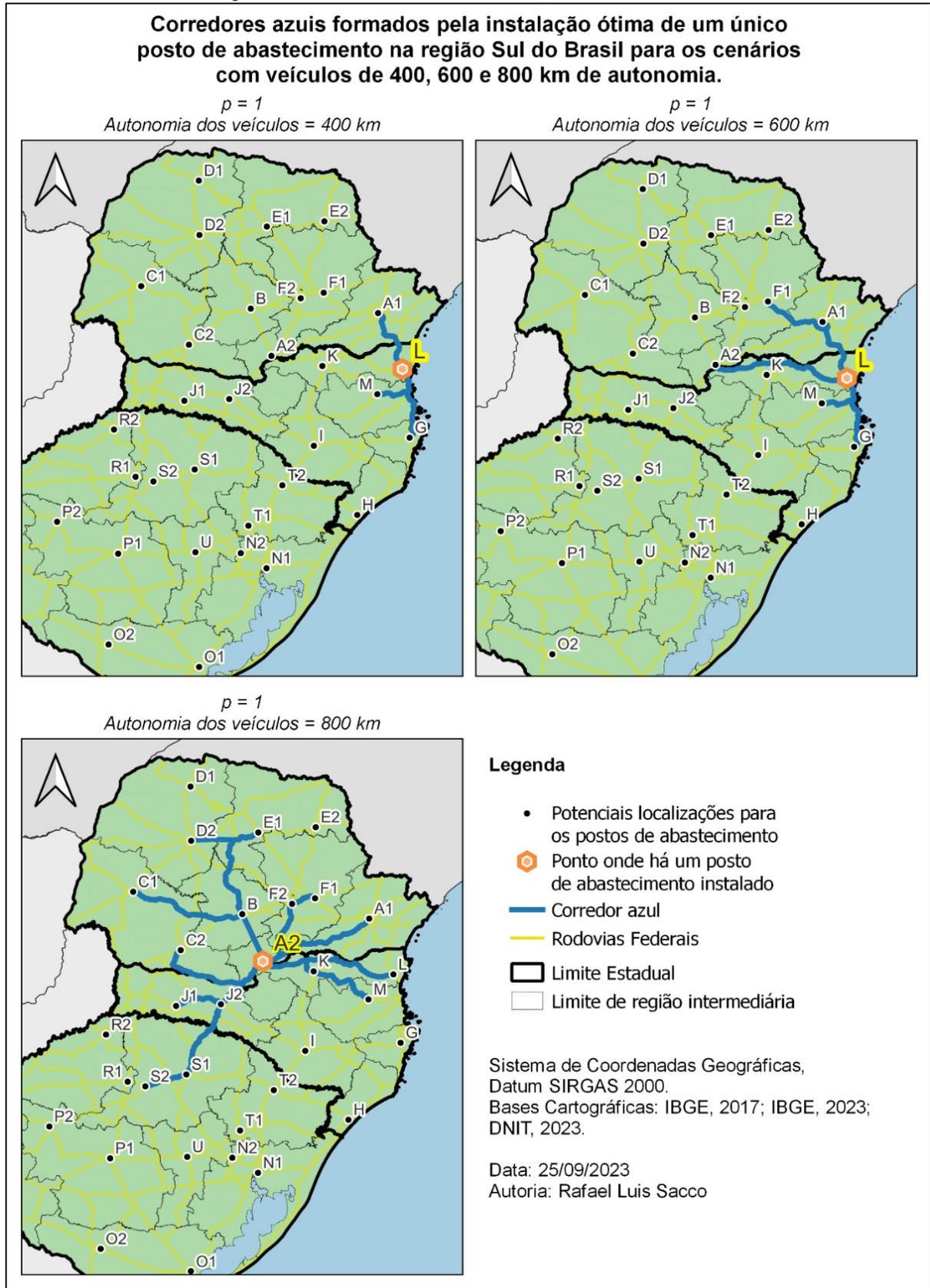
As regiões do sul e do oeste gaúcho, bem como o norte paranaense, apresentaram as menores intensidades no transporte rodoviário regional de cargas, podendo estar relacionado com uma menor atividade industrial e agropecuária nessas regiões. A seção 4.1 a seguir abordará os fluxos atendidos em função do número de postos de abastecimento instalados na Região Sul do Brasil após a execução do modelo FRLM.

4.1. Fluxos atendidos em função do número de facilidades instaladas

Após a execução do modelo FRLM variando os valores de p (quantidade de postos a serem alocados na rede), verificou-se que, para p igual 1, a melhor solução para os cenários com veículos de 400 e 600 km de autonomia seria a instalação de um posto de abastecimento no ponto “L”. Entre as cidades de Joinville, Araquari e Guaramirim, o ponto “L” está localizado em uma das zonas com maior atividade industrial da Região Sul do Brasil, o que justifica o alto fluxo de caminhões nesta região. Com um único posto em “L”, seria possível atender aproximadamente 13,1% e 14,6% do fluxo da rede analisada para veículos com 400 e 600 km de autonomia, respectivamente.

Por outro lado, verificou-se que, para veículos com 800 km de autonomia, a melhor solução para p igual a 1 seria a instalação de um posto de abastecimento no ponto “A2”, contemplando os municípios pertencentes à região imediata de União da Vitória, no sul do Paraná. Atendendo os fluxos de caminhões entre as regiões de Curitiba e oeste catarinense, um único posto de abastecimento localizado no ponto “A2” conseguiria atender 23,36% do fluxo regional de veículos pesados de carga com autonomia de 800 km. A Figura 20 mostra os corredores azuis formados com a localização ótima de um único posto de abastecimento na Região Sul do Brasil para os cenários com veículos de 400, 600 e 800 km de autonomia.

Figura 20 – Corredores azuis formados pela instalação ótima de um único posto de abastecimento na Região Sul do Brasil para os cenários com veículos de 400, 600 e 800 km de autonomia.



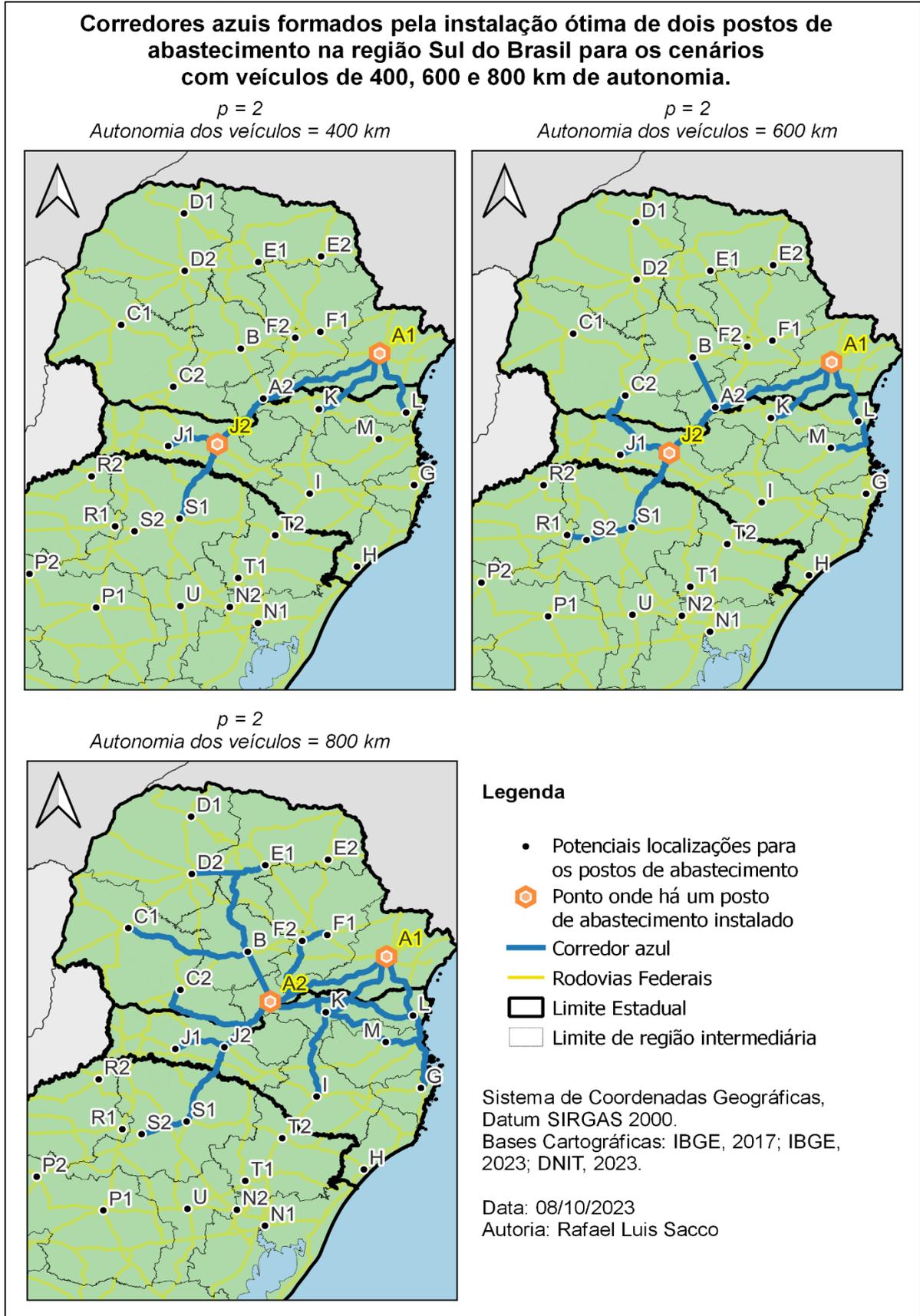
Fonte: Elaborado pelo autor através do software QGIS.

Para p igual a 2, o modelo indicou como solução ótima a alocação de postos de abastecimento em “A1” e “J2” para veículos com autonomies de 400 e 600 km, atendendo os fluxos ao redor de Curitiba e ao longo do oeste catarinense. A solução atenderia 23,4% e 30,0% do fluxo regional de caminhões com autonomies de 400 e 600 km, respectivamente. Nota-se que, para essas duas autonomies, o ponto “L” não se encontra na solução ótima para p igual a 2, mesmo sendo a melhor solução para p igual a 1. Nem sempre a melhor solução para p igual a n será apenas o incremento de uma alocação de posto de abastecimento a uma solução obtida para p igual a $n-1$, demonstrando o comportamento sistêmico do modelo de otimização FRLM.

Para o cenário com veículos de 800 km de autonomia, o ponto “A2”, indicado como solução ótima pelo modelo para p igual a 1, também fez parte da solução ótima para p igual a 2: “A1” e “A2”. A solução atenderia 39,1% do fluxo regional de caminhões com autonomies de 800 km, atendendo as regiões de Curitiba e União da Vitória, no sul do Paraná. A Figura 21 mostra os corredores azuis formados com a localização ótima de dois postos de abastecimento para os cenários com veículos de 400, 600 e 800 km de autonomia.

Para valores de p igual a 3, o modelo indicou como solução a instalação de postos de abastecimento nos pontos “A1”, “A2” e “T2” para o cenário com veículos de 800 km de autonomia, conseguindo atender mais da metade do transporte rodoviário de cargas na região (53,6%). Para os outros cenários, o modelo indicou a necessidade de no mínimo 5 postos de abastecimento para o cenário com veículos de 600 km de autonomia (com postos nos pontos “A1”, “G”, “I”, “J2” e “N1”) e 8 postos de abastecimento para o cenário com veículos de 400 km de autonomia (com postos nos pontos “A1”, “H”, “I”, “J2”, “L”, “M”, “N1” e “T1”) para o atendimento de ao menos 50,0% do fluxo regional de veículos pesados de carga. Os apêndices D, E e F mostram o conjunto de soluções ótimas obtidas pelo modelo FRLM para cada valor de p em cada cenário de autonomia considerado neste trabalho.

Figura 21 – Corredores azuis formados pela instalação ótima de dois postos de abastecimento na Região Sul do Brasil para os cenários com veículos de 400, 600 e 800 km de autonomia.

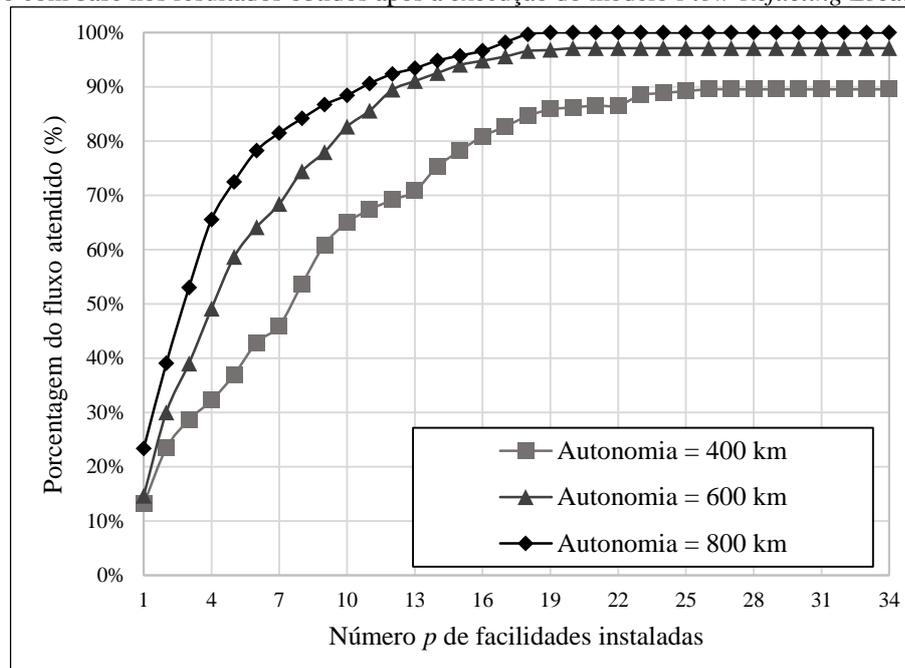


Fonte: Elaborado pelo autor através do software QGIS.

4.2. Análise comparativa dos resultados

O gráfico da Figura 22 mostra a porcentagem do fluxo de caminhões atendido em função do número de facilidades instaladas ao longo das rodovias da Região Sul do Brasil para os veículos com 400, 600 e 800 km de autonomia, possibilitando a realização de uma análise comparativa dos resultados obtidos.

Figura 22 – Porcentagem do fluxo de caminhões atendidos em função do número de facilidades instaladas, construído com base nos resultados obtidos após a execução do modelo *Flow-Refueling Location Model*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme mostrado pelo gráfico da Figura 22, nota-se uma relação não-linear entre a porcentagem do fluxo de caminhões atendido e o número de facilidades instaladas, havendo a diminuição do ganho marginal do fluxo atendido conforme aumentam os valores de p . Outros estudos na literatura também apresentaram curvas similares (KUBY *et al.*, 2009; KUBY; LIM, 2005; PIENE; PERATINOS, 2022).

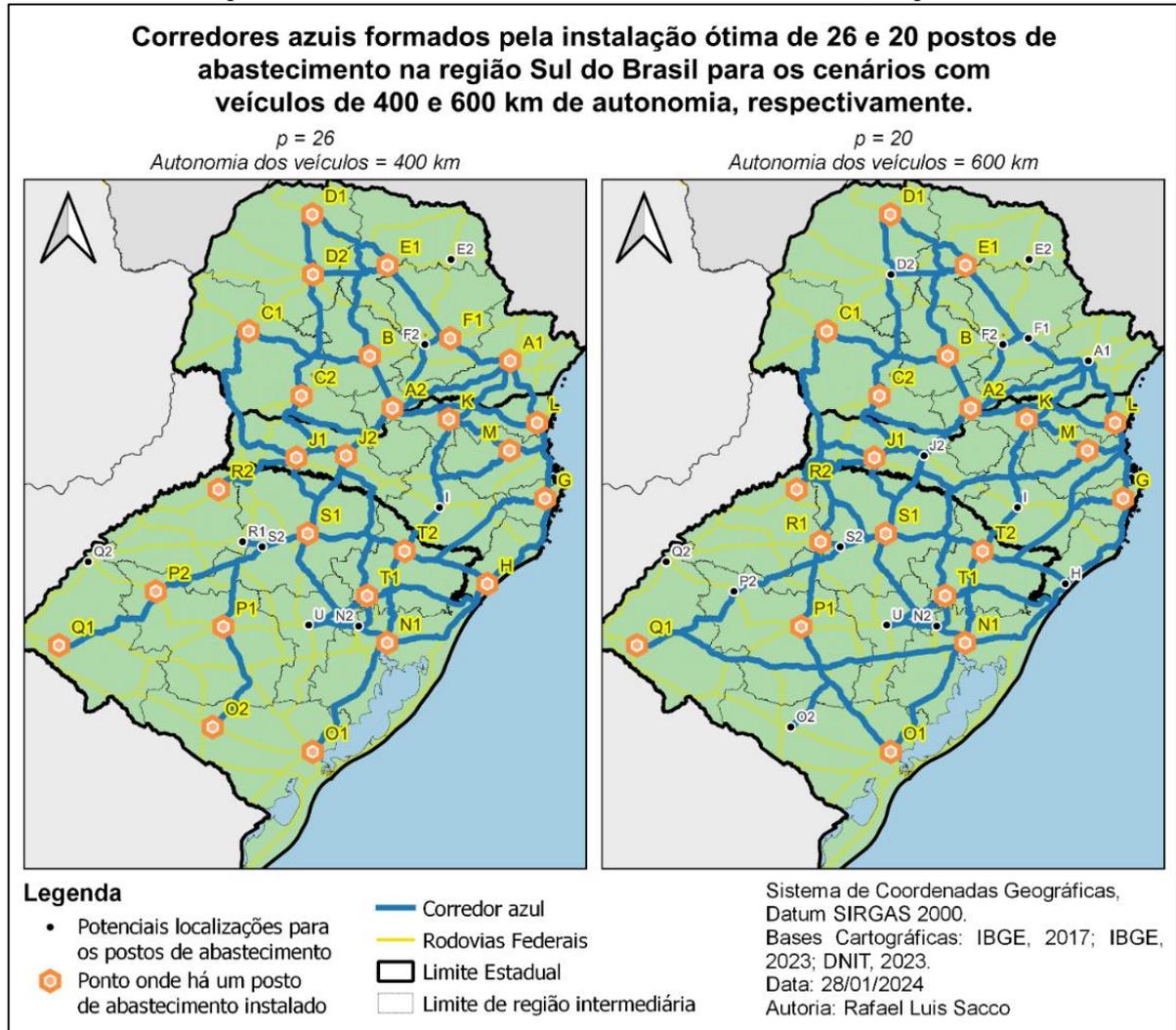
Observa-se também que, a partir de 26 facilidades instaladas, não há incremento no fluxo atendido para veículos com 400 km de autonomia. Dessa forma, o valor máximo da porcentagem do fluxo que poderia ser atendido dada a disposição adotada nesta pesquisa para as potenciais localidades de instalação de postos de abastecimento seria de 89,6%. Ou seja, mesmo alocando postos em todas as potenciais localizações, aproximadamente 10,4% dos veículos não conseguiriam completar suas viagens de ida e volta devido a impossibilidade de abastecimento ao longo de suas trajetórias.

Para p igual a 26, o modelo encontrou como solução ótima a instalação de postos de abastecimento nos pontos “A1”, “A2”, “B”, “C1”, “C2”, “D1”, “D2”, “E1”, “F1”, “G”, “H”,

“J1”, “J2”, “K”, “L”, “M”, “N1”, “O1”, “O2”, “P1”, “P2”, “Q1”, “R2”, “S1”, “T1” e “T2” para veículos com 400 km de autonomia, atendendo 89,6% do fluxo da região (o máximo que este cenário conseguiu atender, como mencionado no parágrafo anterior). Assim, dos 100 caminhos de maior fluxo considerados neste trabalho, 16 deles não conseguiram ser atendidos neste cenário: IDs 19, 20, 27, 28, 33, 39, 40, 45, 50, 72, 73, 81, 84, 91, 95 e 96 do apêndice B.

Para os veículos com autonomia de 600 km, o resultado foi similar. A partir de 20 postos instalados, não há incremento no fluxo atendido. Assim, o valor máximo da porcentagem do fluxo que poderia ser atendido seria de 97,1%, sendo 2,9% dos fluxos não atendidos mesmo com uma facilidade instalada em todas as potenciais localizações. Portanto, para p igual a 20, o modelo encontrou como solução ótima a instalação de postos de abastecimento nos pontos “A2”, “B”, “C1”, “C2”, “D1”, “E1”, “G”, “J1”, “K”, “L”, “M”, “N1”, “O1”, “P1”, “Q1”, “R1”, “R2”, “S1”, “T1” e “T2”. Neste cenário, dos 100 caminhos de maior fluxo considerados neste trabalho, apenas 3 deles não conseguiram ser atendidos: IDs 20, 28 e 45 do apêndice B. A Figura 23 mostra os resultados otimizados de p igual a 26 para a autonomia de 400 km e de p igual a 20 para a autonomia de 600 km.

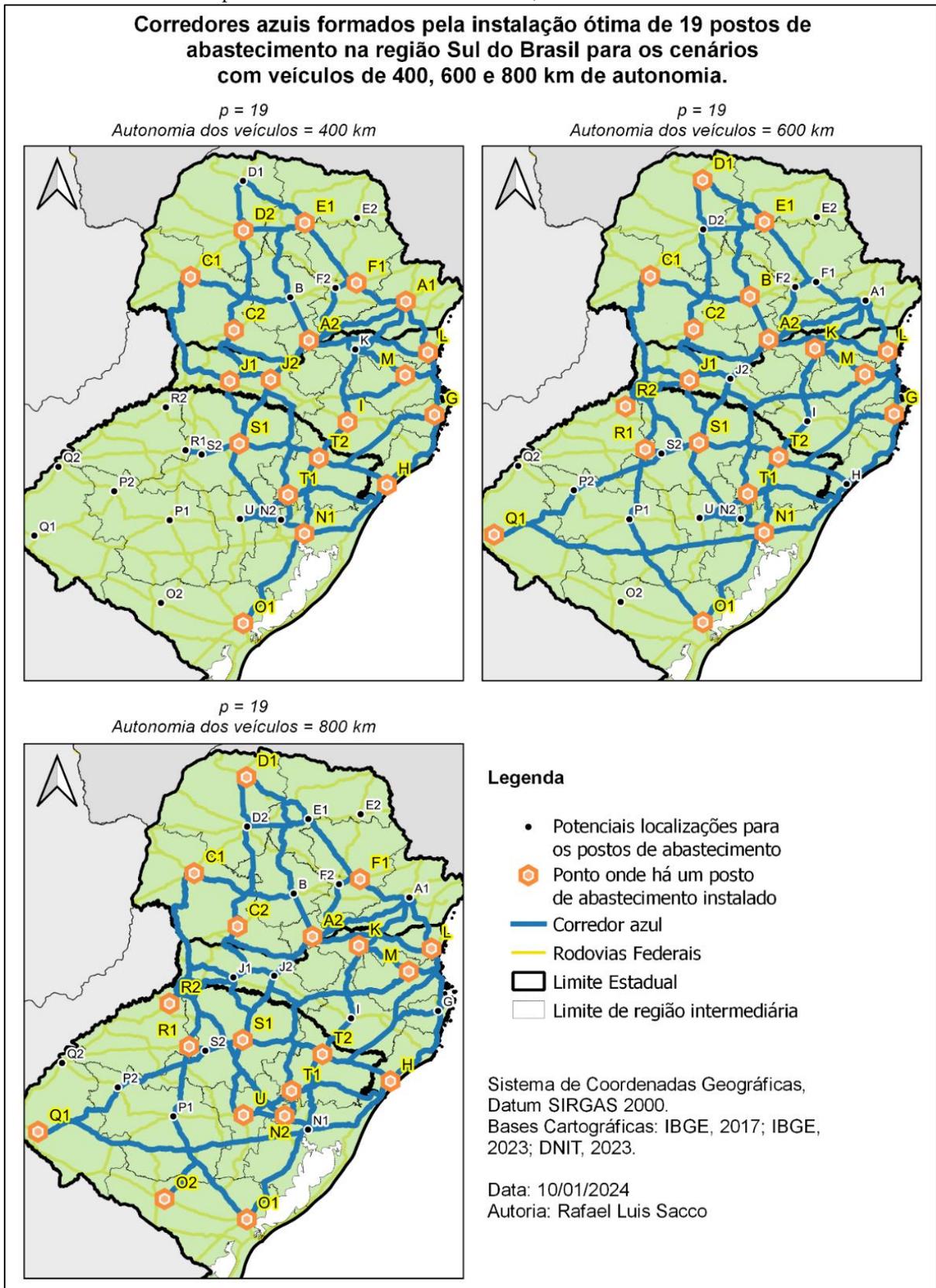
Figura 23 – Corredores azuis formados pela instalação ótima de 26 e 20 postos de abastecimento na Região Sul do Brasil para os cenários com veículos de 400 e 600 km de autonomia, respectivamente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dada as possibilidades de alocação dos postos de abastecimento deste trabalho, todos os fluxos puderam ser atendidos apenas no cenário com veículos de 800 km de autonomia e com no mínimo 19 postos de abastecimento instalados na região. Portanto, para p igual a 19, o modelo encontrou como solução ótima a instalação de postos de abastecimento nos pontos “A2”, “C1”, “C2”, “D1”, “F1”, “H”, “K”, “L”, “M”, “N2”, “O1”, “O2”, “Q1”, “R1”, “R2”, “S1”, “T1”, “T2” e “U”. A Figura 24 mostra os corredores azuis formados com a localização ótima de 19 postos de abastecimento para os cenários com veículos de 400, 600 e 800 km de autonomia.

Figura 24 – Corredores azuis formados pela instalação ótima de 19 postos de abastecimento na Região Sul do Brasil para os cenários com veículos de 400, 600 e 800 km de autonomia.



Fonte: Elaborado pelo autor através do software QGIS.

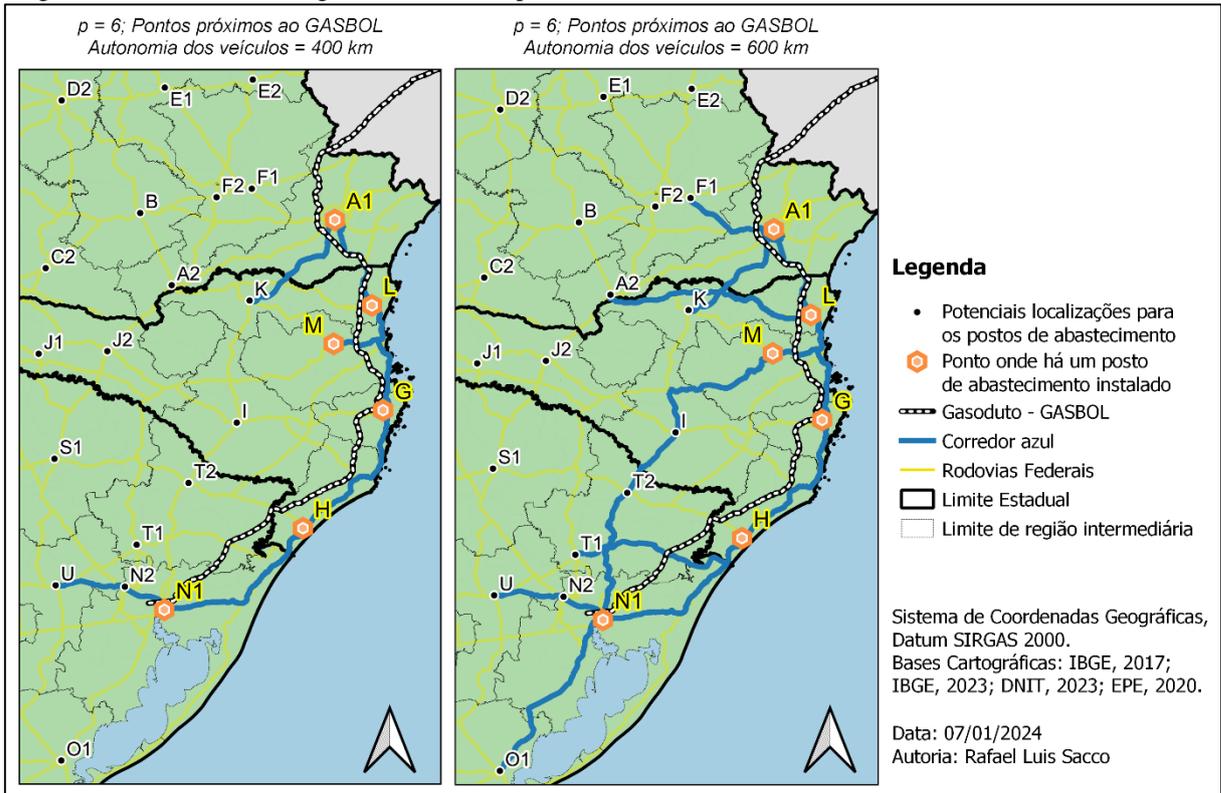
Por fim, observou-se que, para valores de p iguais a 4 e 5, um aumento de 50,0% na autonomia dos veículos, ou seja, de 400 para 600 km, representou um aumento de 52,5% e 58,7% na porcentagem do fluxo atendido, respectivamente. Esses dois casos foram os únicos em que o percentual do ganho do fluxo atendido de veículos foi maior do que o percentual do aumento de suas autonomies para um mesmo valor de p . A seção 4.3 a seguir discute os resultados obtidos e algumas implicações.

4.3. Discussão dos resultados e implicações

Esta seção buscou atender parte do objetivo específico 3 deste trabalho conforme descrito pelo Quadro 1. O caráter sistêmico do FRLM mostra aos pesquisadores os locais de maior interesse para a instalação de postos de abastecimento com base no fluxo e nas autonomies dos veículos que percorrem por uma determinada região. Entretanto, a disponibilidade do gás natural também é um fator de decisão importante e que impacta diretamente a viabilidade de implementação de um corredor azul. Atualmente, grande parte do gás natural que abastece a Região Sul do Brasil é importada da Bolívia, que chega ao Brasil via Gasoduto Bolívia-Brasil, também conhecido como GASBOL. Próximo à BR-376 e à BR-101, rodovias com grande fluxo de veículos pesados de carga, o GASBOL poderia fornecer o gás natural para os postos instalados em toda a faixa litorânea da região.

A Figura 25 mostra os fluxos atendidos caso fossem instalados postos de abastecimento nos pontos próximos ao traçado do GASBOL, aproveitando a infraestrutura de transporte já existente, para os cenários com veículos de 400 e 600 km de autonomia. Considerou-se uma distância linear máxima de 33 km entre o traçado do gasoduto e os potenciais pontos de abastecimento para que os mesmos fossem classificados como próximos ao GASBOL. Este valor foi adotado utilizando como referência o projeto de um terminal de regaseificação de GNL em São Francisco do Sul (SC), que prevê a construção de um gasoduto de 33 km de extensão para conectá-lo ao GASBOL, conforme detalhado nos parágrafos seguintes. Outras distâncias máximas poderiam ser adotadas dependendo do racional definido, como limitação de custos, viabilidade econômica, viabilidade técnica, etc.

Figura 25 – Corredores azuis formados pela instalação de postos de abastecimento em pontos próximos ao gasoduto GASBOL na Região Sul do Brasil para os cenários com veículos de 400 e 600 km de autonomia.



Fonte: Elaborado pelo autor através do *software QGIS*.

Conforme mostrado pela Figura 25, os pontos mais próximos ao traçado do GASBOL são: “A1”, “L”, “M”, “G”, “H” e “N1”. As instalações de postos de abastecimento nesses pontos proporcionariam o atendimento de 23,6% e 31,8% do fluxo regional de veículos pesados de carga para os cenários com veículos de 400 e 600 km de autonomia, respectivamente. Nota-se que, para o cenário com veículos de 600 km de autonomia, uma maior parte da BR-116 – uma das mais importantes rodovias da Região Sul do Brasil – poderia ser atendida quando comparado com o cenário com veículos de 400 km de autonomia. Entretanto, o trajeto Porto Alegre-Curitiba (“N1” - “A1”), por exemplo, poderia ser contemplado apenas via BR-101, e não pelo caminho mais curto entre as duas capitais, que seria via BR-116. Nesse sentido, será fundamental para uma ampla implementação de corredores azuis na Região Sul do Brasil levar o gás que chega até a faixa litorânea para o interior dos estados.

Visando complementar a disponibilidade de gás natural na região, discute-se atualmente a construção de um gasoduto entre as cidades gaúchas de Uruguaiana e Porto Alegre, conectando o estado do Rio Grande do Sul ao gás produzido na Argentina. Com 615 km de extensão e uma vazão de até 15,0 milhões de m³ por dia (MMm³/d), o traçado projetado para o novo gasoduto também teria pontos de entrega de gás natural nas cidades de Alegrete (RS), Santa Maria (RS), Santa Cruz do Sul (RS) e Taquari (RS). A obra tem grande potencial de

proporcionar uma maior integração do mercado de gás no Cone Sul, possibilitando até a implementação de um corredor azul binacional (EPE, 2020b; TSB, 2023).

Além disso, a Região Sul do Brasil também conta com alguns projetos de construção de terminais de regaseificação de GNL, sendo eles nos municípios de Rio Grande (RS), São José do Norte (RS), Tramandaí (RS), Imbituba (SC), São Francisco do Sul (SC), Paranaguá (PR) e Pontal do Paraná (PR), podendo conectar a região ao gás produzido em diversos países do mundo. Entre os projetos, um dos mais avançados está no município de São Francisco do Sul (SC), com a construção do Terminal Gás Sul - TGS, um empreendimento da empresa New Fortress Energy. O projeto prevê a capacidade de regaseificação de até 15 MMm³/dia e a construção de um gasoduto de 33 km de extensão entre o novo terminal até o município de Garuva (SC), onde será conectado ao GASBOL (EPE, 2019; TGS, 2022).

Caso os projetos supracitados se concretizem, a oferta de gás na Região Sul do Brasil aumentaria significativamente. Uma adição de 15,0 MMm³/dia no sistema representaria aproximadamente três vezes o consumo médio anual de gás natural da região, que nos anos de 2020, 2021 e 2022 chegou a 5,4 MMm³/dia, 6,0 MMm³/dia e 4,6 MMm³/dia¹¹, respectivamente (MME, 2023).

Uma alternativa ao gás importado seria aproveitar o grande potencial de produção da própria Região Sul do Brasil, tanto de origem fóssil, quanto de origem renovável. Localizada acima da bacia sedimentar do Paraná, a região é uma área de grande interesse para a exploração de gás, principalmente gás não convencional. O gás de folhelho presente na formação Ponta Grossa, bem como o metano de carvão presente na formação Rio Bonito da bacia do Paraná, são alguns exemplos de gases não convencionais presentes na região que, se explorados, poderiam atender a demanda regional de veículos movidos a gás natural. Quanto ao gás natural de origem renovável, o oeste catarinense, o norte gaúcho e o sul paranaense, por possuírem uma intensa atividade agrossilvopastoril, se posicionam como grandes potenciais produtores de biometano na região, podendo abastecer os postos localizados mais distantes da costa, por exemplo (SACCO *et al.*, 2022).

Apesar do grande potencial de importação e produção de gás natural na Região Sul do Brasil, alguns desafios importantes para a ampla adoção do gás pelos consumidores ainda precisam ser superados. Segundo EPE (2020a), apesar do uso do gás natural em veículos pesados de carga já possuir um grau relevante de maturidade tecnológica, sua ampla adoção pelos consumidores dependerá basicamente das condições de mercado e de infraestrutura que

¹¹ Dados de consumo foram obtidos por meio da soma das demandas anuais das três concessionárias de distribuição de gás natural da Região Sul do Brasil: Sulgás (RS), SCGás (SC) e Compagás (PR).

a favoreça. Conforme já mencionado na introdução deste trabalho, a segurança na disponibilidade do combustível, o tempo de retorno do investimento e o desenvolvimento de um mercado de veículos pesados movidos a gás natural mais robusto são alguns dos fatores que influenciam a tomada de decisão dos consumidores.

Um desafio ainda maior refere-se à distribuição do gás em sua forma liquefeita entre o local de produção até os postos de abastecimento. Mesmo os veículos movidos a GNL possuem praticamente o dobro da autonomia dos veículos movidos a GNC, os custos envolvidos nos processos de liquefação do gás natural, na construção de uma malha de distribuição ampla e na adequação dos postos para operar com esse tipo de combustível podem tornar a substituição do diesel por GNL economicamente inviável para os consumidores. Alguns incentivos governamentais poderiam ser implementados visando superar essas possíveis barreiras econômicas caso haja a percepção de valor por parte da sociedade em direcionar os recursos recolhidos através dos impostos para esta finalidade.

Além disso, haveria também a necessidade de substituição da frota atual de veículos por uma frota de veículos movidos a GNL, acarretando em um custo adicional que os consumidores talvez não estariam dispostos a pagar. Nesse sentido, o uso do GNC talvez seja uma alternativa ao diesel mais adequada para a realidade da Região Sul do Brasil, não só por já possuir uma tecnologia madura, mas também pela possibilidade de aproveitar a disponibilidade de gás natural em sua forma comprimida já existente em alguns postos de abastecimento da região, conforme mencionado na seção 2.1. A seção 4.4 a seguir irá abordar as limitações deste estudo.

4.4. Limitações do estudo

Esta seção buscou atender parte do objetivo específico 3 deste trabalho conforme descrito pelo Quadro 1. Para que o modelo FRLM pudesse ser aplicado neste trabalho, foram realizadas algumas simplificações da situação real conforme descrito pela seção 3.2. Nesse sentido, este estudo apresenta algumas limitações. São elas: (i) o modelo considerou apenas as distâncias horizontais entre cada ponto de origem e destino, não levando em consideração o relevo da região, fator que influenciaria a autonomia dos veículos; (ii) não foram consideradas as possibilidades de congestionamentos; (iii) não foi levado em consideração as condições das rodovias; e (iv) não foi avaliada a capacidade de abastecimento dos postos. De forma geral, o FRLM busca otimizar o atendimento à demanda, mas não avalia o sistema no âmbito da oferta. Pesquisas futuras podem ser desenvolvidas de forma que preencham essas lacunas metodológicas do modelo desenvolvido por Kuby e Lim (2005).

Além disso, este trabalho considerou apenas o fluxo de caminhões com origem e destino entre cidades localizadas na Região Sul do Brasil. Os resultados poderiam ser diferentes caso a aplicação do modelo abordado contemplasse também os fluxos que apenas começam, terminam ou passam pela região, como os veículos que iniciam suas rotas na Argentina ou Uruguai com destino à São Paulo ou Rio de Janeiro, por exemplo. Tal consideração poderia contribuir para uma integração energética mais robusta no transporte de cargas entre os países do Mercosul. O modelo também não considerou a jornada de trabalho dos motoristas, horários de descanso e paradas, frequência e tempo de abastecimento, tecnologias de abastecimento, etc.

É importante ressaltar que o gás natural comprimido possui características de operação distintas do gás natural liquefeito. Por exemplo, enquanto o GNC pode ser operado em temperatura ambiente, o GNL deve ser mantido a uma temperatura de $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por outro lado, por estar em estado líquido e não gasoso, uma quantidade maior de massa de GNL consegue fluir da bomba para o tanque dos veículos, possuindo, de forma geral, maior agilidade para o abastecimento (CHALA; ABD AZIZ; HAGOS, 2018; NREL, 1992). Essas características distintas de operação entre o GNL e o GNV também não foram consideradas neste trabalho, mas certamente devem ser abordadas em avaliações de viabilidade técnico-econômicas para a implementação de corredores azuis.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho utilizou um modelo oriundo da pesquisa operacional, o *Flow-Refueling Location Model*, para a avaliação da implementação de corredores azuis na Região Sul do Brasil de forma que fosse maximizado o atendimento do fluxo regional de veículos pesados de carga dada uma quantidade limitada de postos de abastecimento instalados na região. O modelo levou em consideração três autonomias de veículos: 400, 600 e 800 km. O cenário com veículos de 400 km de autonomia buscou contemplar os caminhões movidos a GNC, enquanto os cenários com 600 e 800 km de autonomia, os caminhões movidos a GNL.

Os três objetivos específicos elaborados visando atender o objetivo principal deste trabalho puderam ser contemplados. Por meio da revisão da literatura, entendeu-se o conceito e os principais estudos sobre corredores azuis, os principais modelos de otimização para localização e alocação de recursos oriundos da pesquisa operacional e o processo de adequação do problema real às premissas do FRLM. Contemplou-se assim os objetivos específicos 1 e 2, proporcionando a compreensão necessária para que o objetivo específico 3 pudesse ser realizado, sendo possível definir as condições de contorno para a aplicação do modelo e a avaliação crítica e contextual dos resultados obtidos.

O objetivo específico 3 foi contemplado pelas seções 3.1 (na qual levantou-se os dados de entrada para o modelo FRLM: o fluxo de veículos pesados de carga na Região Sul do Brasil, as autonomias dos caminhões movidos a gás natural disponíveis no mercado e os dados georreferenciados das principais rodovias da região), 4.3 e 4.4 (nas quais foram avaliados os resultados obtidos e levantadas as limitações do modelo FRLM). Assim, contemplou-se também o objetivo principal deste trabalho, em que foram avaliados os cenários de implementação dos corredores azuis na Região Sul do Brasil e suas possíveis implicações.

A partir da análise dos resultados, observou-se que, para os veículos com autonomias de 400 e 600 km, seria necessária a instalação de mais postos de abastecimento do que a quantidade considerada neste trabalho para que a totalidade do fluxo regional de veículos pudesse ser atendida. Por outro lado, com apenas 19 postos instalados de forma otimizada ao longo das rodovias sulistas, todos os fluxos regionais de veículos com 800 km de autonomia puderam ser atendidos. Evidencia-se, portanto, uma importante relação entre o desenvolvimento tecnológico da indústria automotiva com a viabilidade de construção de corredores azuis. Veículos com maiores autonomias demandariam uma infraestrutura de abastecimento mais enxuta.

Principal modal de transporte de cargas no Brasil, o modal rodoviário representa um grande desafio para a realização das metas nacionais de transição energética devido ao uso praticamente exclusivo do óleo diesel pelos caminhões. Este trabalho buscou se colocar como mais um pilar da literatura relacionada à implementação de corredores azuis, buscando constituir parte da fundamentação de pesquisas futuras que abordem temas similares ou ainda não explorados.

Algumas variáveis não avaliadas neste trabalho poderiam ser incluídas em estudos futuros, como o relevo da região e/ou os potenciais pontos de congestionamento, por exemplo, fatores que influenciam diretamente a autonomia dos veículos. Outros estudos mais amplos poderiam considerar o fluxo de todos os veículos que passam pela Região Sul do Brasil – inclusive caminhões oriundos de outros países (Uruguai, Argentina, Paraguai, etc.) –, a capacidade dos postos no atendimento à demanda, a possibilidade de desvio do caminho mais curto entre origem e destino por parte dos caminhoneiros para realizar o abastecimento – como abordado em Kim e Kuby (2012) –, a viabilidade de levar e/ou produzir o gás natural no interior da Região Sul do Brasil, etc.

Por fim, outros temas mais abrangentes também poderiam ser abordados visando complementar este trabalho, como o potencial de utilização do biometano produzido na Região Sul do Brasil para o atendimento dos corredores azuis, a viabilidade técnica e econômica de liquefação do gás natural para atender os veículos movidos a GNL, levantamento dos custos de substituição da frota atual de veículos movidos a diesel por veículos movidos a gás natural – considerando, inclusive, os impactos nos preços dos combustíveis –, potencial de redução das emissões de poluentes e gases de efeito estufa ocasionada pela substituição do diesel pelo gás natural na região, soluções para a distribuição do gás natural do seu local de produção até o mercado consumidor, etc. Essas e outras análises trariam novas perspectivas para o debate sobre a transição energética da região.

REFERÊNCIAS

- AIR MINISTRY. **The Origins and Development of Operational Research in the Royal Air Force**. 1963. Londres. Disponível em: <https://www.raf.mod.uk/our-organisation/units/air-historical-branch/second-world-war-thematic-studies/ap3368-operational-research-in-the-royal-air-force/>. Acesso em: 8 jul. 2022.
- ALMEIDA, Edmar Luiz Fagundes De; ALVEAL, Carmen; SOUZA E SILVA, Carla M.; MACKNIGHT, Vivian; MARQUES, Fabio; ZYLBERBERG, Raphael7; TUJEEHUT, Maurice. **Corredores azuis: um estudo da viabilidade da difusão do GNV em rotas internacionais no cone-sul**. 2005. Rio de Janeiro.
- ANG, B. W.; CHOONG, W. L.; NG, T. S. Energy security: Definitions, dimensions and indexes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 42, p. 1077–1093, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2014.10.064.
- ANP. **Processamento de Gás Natural**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/processamento-de-gas-natural>. Acesso em: 20 ago. 2023.
- ANP. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2022**. 2022. Rio de Janeiro.
- ARENALES, Marcos; ARMENTANO, Vinícius; MORABITO, Reinaldo; YANASSE, Horacio. **Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.
- AYUKAWA, Yurika *et al.* **Climate Solutions WWF's Vision for 2050**. 2007. [s.l.: s.n.].
- BERMAN, Oded; LARSON, Richard C.; FOUSKA, Nikoletta. Optimal Location of Discretionary Service Facilities. **Transportation Science**, [S. l.], v. 26, n. 3, p. 201–211, 1992. DOI: 10.1287/trsc.26.3.201.
- BRITO, Thiago Luis Felipe. **Understanding the diffusion of alternative fuels technologies for transport**. 2019. University of São Paulo, São Paulo, 2019.
- CHALA, Girma; ABD AZIZ, Abd; HAGOS, Ftwi. **Natural Gas Engine Technologies: Challenges and Energy Sustainability Issue**. *Energies*, [S. l.], v. 11, n. 11, p. 2934, 2018. DOI: 10.3390/en11112934.
- CHURCH, Richard; REVELLE, Charles. The maximal covering location problem. *In: PAPERS OF THE REGIONAL SCIENCE ASSOCIATION 1974*, **Anais** [...]. : Springer-Verlag, 1974. p. 101–118.
- CNT. **Pesquisa CNT perfil empresarial 2021: transporte rodoviário de cargas**. 2022. Brasília. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/5eed5ecf-957b-414a-82ce-80b4f85bf1ba>. Acesso em: 3 nov. 2022.
- COMPAGAS. **Balanço 2022: Compagas comemora marca de 1 milhão de m³/dia de gás**

canalizado distribuído e novas ações com foco em sustentabilidade. 2022. Disponível em: [https://www.compagas.com.br/balanco-2022-compagas-comemora-marca-de-1-milhao-de-m³-dia-de-gas-canalizado-distribuido-e-novas-acoes-com-foco-em-sustentabilidade/](https://www.compagas.com.br/balanco-2022-compagas-comemora-marca-de-1-milhao-de-m3-dia-de-gas-canalizado-distribuido-e-novas-acoes-com-foco-em-sustentabilidade/). Acesso em: 31 out. 2023.

CONSULGÁS. **Projeto 33: Estudo dos Corredores Azuis e a Integração dos Estados do Sudeste.** 2022. São Paulo.

CRÖNERT, Tobias; MINNER, Stefan. Location selection for hydrogen fuel stations under emerging provider competition. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [S. l.], v. 133, p. 103426, 2021. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103426.

DNIT. **DNITCloud. Repositório compartilhado por DNITGeo Geotecnologias Aplicadas.** 2023a. Disponível em: [https://servicos.dnit.gov.br/dnitcloud/index.php/s/oTpPRmYs5AAdiNr?path=%2FSDNV Bases Geométricas \(2013-Atual\) \(SHP\)](https://servicos.dnit.gov.br/dnitcloud/index.php/s/oTpPRmYs5AAdiNr?path=%2FSDNV+Bases+Geométricas+(2013-Atual)+(SHP)). Acesso em: 1 fev. 2023.

DNIT. **Plano Nacional de Contagem de Tráfego - PNCT.** 2023b. Disponível em: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/PesquisaOD>. Acesso em: 25 jan. 2023.

EPE. **Terminais de Regaseificação de GNL no Brasil: Panorama dos Principais Projetos.** 2019. Rio de Janeiro. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-412/Nota Técnica - Terminais de Regaseificação de GNL no Brasil \(Ciclo 2018-2019\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-412/Nota+Técnica+-+Terminais+de+Regaseificação+de+GNL+no+Brasil+(Ciclo+2018-2019).pdf). Acesso em: 4 jan. 2024.

EPE. **Plano Nacional de Energia 2050.** 2020a. Brasília.

EPE. **A indústria de gás natural na Argentina.** 2020b. [s.l: s.n.]. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-492/Nota Técnica A Indústria Gas Natural na Argentina_Panorama perspectivas e oportunidades para o Brasil_DPG_SPG.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-492/Nota+Técnica+A+Indústria+Gas+Natural+na+Argentina_Panorama+perspectivas+e+oportunidades+para+o+Brasil_DPG_SPG.pdf). Acesso em: 4 jan. 2024b.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2022: Ano base 2021.** 2021. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 18 ago. 2022.

ERDOĞAN, Sevgi; ÇAPAR, İsmail; ÇAPAR, İbrahim; NEJAD, Mohammad Motalleb. Establishing a statewide electric vehicle charging station network in Maryland: A corridor-based station location problem. **Socio-Economic Planning Sciences**, [S. l.], v. 79, p. 101127, 2022. DOI: 10.1016/j.seps.2021.101127.

EXAME. São Paulo-Curitiba é mais novo corredor para abastecer caminhões a gás. **Revista Exame**, [S. l.], 2021.

FONTANA, Heron. **Logística Operacional - Alocação de bases operacionais em distribuição de energia elétrica.** 2015. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

GALBIERI, Rodrigo; BRITO, Thiago Luis Felipe; MOUETTE, Dominique; DE MEDEIROS

COSTA, Hirdan Katarina; MOUTINHO DOS SANTOS, Edmilson; FAGÁ, Murilo Tadeu Werneck. Bus fleet emissions: new strategies for mitigation by adopting natural gas. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, [S. l.], v. 23, n. 7, p. 1039–1062, 2018. DOI: 10.1007/s11027-017-9771-y.

GOLDBERG, David E.; HOLLAND, John H. Genetic Algorithms and Machine Learning. **Machine Learning**, [S. l.], v. 3, n. 2/3, p. 95–99, 1988. DOI: 10.1023/A:1022602019183.

GOODCHILD, Michael F.; NORONHA, Valerian T. Location-allocation and impulsive shopping: the case of gasoline retailing. **Spatial analysis and location-allocation models**, [S. l.], p. 121–136, 1987.

GREFENSTETTE, John J. Genetic Algorithms and Machine Learning. **Navy Center for Applied Research in Artificial Intelligence**, [S. l.], p. 3–4, 1993.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

HODGSON, J. M.; ROSING, K. E.; LEONTIEN, A.; STORRIER, G. Applying the flow-capturing location-allocation model to an authentic network: Edmonton, Canada. **European Journal of Operational Research**, [S. l.], v. 90, n. 3, p. 427–443, 1996. DOI: 10.1016/0377-2217(95)00034-8.

HODGSON, M. John. A Flow-Capturing Location-Allocation Model. **Geographical Analysis**, [S. l.], v. 22, n. 3, p. 270–279, 1990. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1990.tb00210.x.

IBGE. **Divisão Regional do Brasil**. 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redes-geograficas/15778-divisoes-regionais-do-brasil.html>. Acesso em: 5 set. 2023.

IBGE. **Produto Interno Bruto - PIB**. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>. Acesso em: 22 nov. 2022.

IBGE. **Portal de Mapas**. 2023. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa223417>. Acesso em: 1 fev. 2023.

IGU; UNECE. **Natural Gas for Vehicles (NGV)**. 2012. Kuala Lumpur.

IPAM. **CO2 equivalente (CO2e)**. 2023. Disponível em: <https://ipam.org.br/glossario/co2-equivalente-co2e/#:~:text=É uma medida métrica utilizada,acordo com o artigo 5>. Acesso em: 6 ago. 2023.

KIM, Jong-Geun; KUBY, Michael. The deviation-flow refueling location model for optimizing a network of refueling stations. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 37, n. 6, p. 5406–5420, 2012. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.08.108.

KUBY, Michael; LIM, Seow. The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles. **Socio-Economic Planning Sciences**, [S. l.], v. 39, n. 2, p. 125–145, 2005. DOI: 10.1016/j.seps.2004.03.001.

KUBY, Michael; LINES, Lee; SCHULTZ, Ronald; XIE, Zhixiao; KIM, Jong-Geun; LIM, Seow. Optimization of hydrogen stations in Florida using the Flow-Refueling Location Model. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 34, n. 15, p. 6045–6064, 2009. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.05.050.

LAUGHLIN, Michael; BURNHAM, Andrew. **Case Study - Natural Gas Regional Transport Trucks**. 2016. [s.l: s.n.]. Disponível em: https://afdc.energy.gov/files/u/publication/ng_regional_transport_trucks.pdf. Acesso em: 15 out. 2023.

LOBKOV, Dmitri Dmitrievich. **Análise econômica para a substituição do uso de combustível diesel por GNC no transporte público de passageiros**. 2005. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1602108>. Acesso em: 4 nov. 2022.

MACHADO, Pedro G.; TEIXEIRA, Ana C. R.; COLLAÇO, Flavia M. A.; MOUETTE, Dominique. Review of life cycle greenhouse gases, air pollutant emissions and costs of road medium and heavy-duty trucks. **WIREs Energy and Environment**, [S. l.], v. 10, n. 4, 2021. DOI: 10.1002/wene.395.

MARINS, Fernando Augusto Silva. **Introdução à Pesquisa Operacional**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2011.

MARTÍ, Rafael; REINELT, Gerhard. Heuristic Methods. *In*: [s.l: s.n.]. p. 27–57. DOI: 10.1007/978-3-662-64877-3_2.

MME. **Boletim de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural - Agosto de 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural/2023/08-boletim-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural-agosto-de-2023.pdf/view>. Acesso em: 4 jan. 2024.

MOUETTE, Dominique; MACHADO, Pedro Gerber; FRAGA, Denis; PEYERL, Drielli; BORGES, Raquel Rocha; BRITO, Thiago Luis Felipe; SHIMOMAEBARA, Lena Ayano; DOS SANTOS, Edmilson Moutinho. Costs and emissions assessment of a Blue Corridor in a Brazilian reality: The use of liquefied natural gas in the transport sector. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 668, p. 1104–1116, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.255.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br>. Acesso em: 25 jan. 2024.

NREL. **Comparison of CNG and LNG Technologies for Transportation Applications**. 1992 [s.l: s.n.].

PETROBRÁS. **Óleo Diesel - Informações Técnicas**. 2021 [s.l: s.n.].

PIENE, Johannes; PERATINOS, Alexandros. **Optimal Location of Electric Vehicle Charging Stations in Norway using the Flow refueling Location Model**. 2022. BI Norwegian Business School, [S. l.], 2022.

RENAULT TRUCKS. **Renault Trucks D Wide CNG**. 2021. Disponível em: <https://www.renault-trucks.co.uk/product/renault-trucks-d-wide-cng#>. Acesso em: 15 out. 2023.

REŞİTOĞLU, İbrahim Aslan; ALTINIŞIK, Kemal; KESKIN, Ali. The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. **Clean Technologies and Environmental Policy**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 15–27, 2015. DOI: 10.1007/s10098-014-0793-9.

RODRIGUE, Jean-Paul. Transportation Modes, Modal Competition and Modal Shift. *In: The Geography of Transport Systems*. 5. ed. New York: Routledge, 2020.

ROSE, Lars; HUSSAIN, Mohammed; AHMED, Syed; MALEK, Kourosh; COSTANZO, Robert; KJEANG, Erik. A comparative life cycle assessment of diesel and compressed natural gas powered refuse collection vehicles in a Canadian city. **Energy Policy**, [S. l.], v. 52, p. 453–461, 2013. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.09.064.

SACCO, Rafael Luis; BRITO, Thiago Luis Felipe; MOUTINHO DOS SANTOS, Edmilson; MATAI, Patrícia Helena Lara dos Santos. Unconventional sources of gaseous energy in the Southern Region of Brazil: a comparative SWOT analysis. **Revista Brasileira de Energia**, [S. l.], v. 28, n. 2, 2022. DOI: 10.47168/rbe.v28i2.677.

SCANIA BRASIL. **Caminhões Scania movidos a gás**. São Bernardo do Campo. Disponível em: https://www.scania.com/content/dam/www/market/br/pdfs1/especificacoes/caminhoes/00087-2020_caminhoes_a_gas_Low.pdf. Acesso em: 20 jan. 2023.

SEEG. **Emissões por setor | Energia**. 2022. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/sectors/energia>. Acesso em: 4 nov. 2022.

SELLEY, Richard C.; SONNENBERG, Stephen A. The Physical and Chemical Properties of Petroleum. *In: Elements of Petroleum Geology*. [s.l.] : Elsevier, 2015. p. 13–39. DOI: 10.1016/B978-0-12-386031-6.00002-3.

SEMIN, Rosli Abu Bakar. A Technical Review of Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel for Internal Combustion Engines. **American J. of Engineering and Applied Sciences**, [S. l.], v. 1, n. 4, p. 302–311, 2008.

SOVACOOOL, Benjamin K. An international assessment of energy security performance. **Ecological Economics**, [S. l.], v. 88, p. 148–158, 2013. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2013.01.019.

STOCCHETTI, Andrea; VOLPATO, Giuseppe. In quest for a sustainable motorization: the CNG opportunity. **International Journal of Automotive Technology and Management**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 13–36, 2010. Disponível em: <https://mpr.ub.uni-muenchen.de/id/eprint/31190>. Acesso em: 17 nov. 2022.

TAHA, Hamdy A. **Operations research: an introduction**. 8. ed. Nova Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007.

TGS. **Novo terminal de gás natural no Norte de SC pode aumentar oferta em quase 200%**. 2022.

TOTAL. **All about CNG**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://gasmobility.totalenergies.com/system/files/atoms/files/all-about-cng.pdf>. Acesso em: 24 maio. 2024.

TSB. **O Gasoduto**. 2023. Disponível em: <https://www.tsb.com.br/o-gasoduto/>. Acesso em: 4 jan. 2024.

UNECE. **Blue Corridor Project: On the Use of Natural Gas a Motor Fuel in International Freight and Passenger Traffic**. New York and Geneva.

UNFCCC. **Glossary**. 2023. Disponível em: [https://unfccc.int/resource/cd_roms/na1/ghg_inventories/english/8_glossary/Glossary.htm#:~:text=Greenhouse effect.,back toward the earth%27s surface](https://unfccc.int/resource/cd_roms/na1/ghg_inventories/english/8_glossary/Glossary.htm#:~:text=Greenhouse%20effect.,back%20toward%20the%20earth%27s%20surface). Acesso em: 24 out. 2023.

VAN GRINSVEN, Anouk et al. **Research for TRAN Committee – Alternative fuel infrastructures for heavy-duty vehicles**. 2021. Brussels.

VOLVO TRUCKS. **Reduce your footprint with gas-powered trucks**. 2023. Disponível em: <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/renewable-fuels/gas-powered-trucks.html>. Acesso em: 15 out. 2023.

WEC. **World Energy Scenarios: Composing energy futures to 2050**. 2013. London.

XU, Tianze; LI, Leilei; FAN, Shu. Hydrogen station allocation based on equilibrium traffic flow. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S. l.], 2023. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.210.

APÊNDICE A – Regiões Intermediárias e Imediatas correspondentes a cada ponto potencial de abastecimento deste trabalho

Ponto Potencial de Abastecimento	Região Intermediária correspondente	UF	Área da Região Intermediária (km ²)	Quantidade de Pontos Potenciais de Abastecimento na Região Intermediária correspondente.	Regiões Imediatas correspondentes a cada Ponto Potencial de Abastecimento
A1	Curitiba	PR	29.947	2	Curitiba; Paranaguá
A2	Curitiba	PR	29.947	2	União da Vitória
B	Guarapuava	PR	19.292	1	Guarapuava; Pitanga
C1	Cascavel	PR	44.698	2	Cascavel; Foz do Iguaçu; Toledo; Marechal Cândido Rondon
C2	Cascavel	PR	44.698	2	Francisco Beltrão; Pato Branco; Laranjeiras do Sul - Quedas do Iguaçu; Dois Vizinhos
D1	Maringá	PR	43.049	2	Maringá; Paranavaí; Paranacity - Colorado; Loanda
D2	Maringá	PR	43.049	2	Campo Mourão; Cianorte; Umuarama
E1	Londrina	PR	32.536	2	Apucarana; Ivaiporã; Londrina
E2	Londrina	PR	32.536	2	Cornélio Procópio – Bandeirantes; Ibaiti; Santo Antônio da Platina
F1	Ponta Grossa	PR	29.778	2	Ponta Grossa; Telêmaco Borba
F2	Ponta Grossa	PR	29.778	2	Irati
G	Florianópolis	SC	6.023	1	Florianópolis
H	Criciúma	SC	9.413	1	Araranguá; Criciúma; Tubarão
I	Lages	SC	19.433	1	Curitibanos; Lages
J1	Chapecó	SC	24.603	2	Chapecó; Maravilha; São Lourenço do Oeste; São Miguel do Oeste
J2	Chapecó	SC	24.603	2	Concórdia; Joaçaba - Herval d'Oeste; Xanxerê
K	Caçador	SC	6.203	1	Caçador; Videira

L	Joinville	SC	14.771	1	Joinville; Mafra; São Bento do Sul - Rio Negrinho
M	Blumenau	SC	15.286	1	Blumenau; Brusque; Ibirama - Presidente Getúlio; Itajaí; Ituporanga; Rio do Sul
N1	Porto Alegre	RS	29.376	2	Porto Alegre; Novo Hamburgo - São Leopoldo; Taquara - Parobé - Igrejinha; Torres; Tramandaí - Osório
N2	Porto Alegre	RS	29.376	2	Camaquã; Charqueadas - Triunfo - São Jerônimo; Montenegro
O1	Pelotas	RS	44.870	2	Pelotas
O2	Pelotas	RS	44.870	2	Bagé
P1	Santa Maria	RS	43.697	2	Cachoeira do Sul; Santa Maria; São Gabriel - Caçapava do Sul
P2	Santa Maria	RS	43.697	2	Santiago
Q1	Uruguaiiana	RS	39.085	2	Santana do Livramento; Uruguaiiana
Q2	Uruguaiiana	RS	39.085	2	São Borja
R1	Ijuí	RS	27.474	2	Cerro Largo; Ijuí; Santo Ângelo; São Luiz Gonzaga
R2	Ijuí	RS	27.474	2	Santa Rosa; Três de Maio; Três Passos
S1	Passo Fundo	RS	42.307	2	Erechim; Lagoa Vermelha; Marau; Passo Fundo; Soledade; Tapejara - Sananduva
S2	Passo Fundo	RS	42.307	2	Carazinho; Cruz Alta; Frederico Westphalen; Nonoai; Palmeira das Missões
T1	Caxias do Sul	RS	24.121	2	Bento Gonçalves; Caxias do Sul; Nova Prata - Guaporé
T2	Caxias do Sul	RS	24.121	2	Vacaria
U	Santa Cruz do Sul - Lajeado	RS	17.691	1	Encantado; Lajeado; Santa Cruz do Sul; Sobradinho

APÊNDICE B – Origem e destino dos cem maiores fluxos regionais de veículos pesados de carga para a Região Sul do Brasil com base nas Pesquisas Nacionais de Tráfego (PNT)

ID	Origem	Região intermediária correspondente	Destino	Região intermediária correspondente	Total de viagens declaradas na rota	Porcentagem do fluxo da rota em comparação com o total regional
1	A1	Curitiba	L	Joinville	404	6,41%
2	J1	Chapecó	A1	Curitiba	254	4,03%
3	M	Blumenau	A1	Curitiba	190	3,02%
4	A1	Curitiba	S1	Passo Fundo	187	2,97%
5	H	Criciúma	N1	Porto Alegre	185	2,94%
6	J2	Chapecó	A1	Curitiba	179	2,84%
7	C2	Cascavel	J1	Chapecó	155	2,46%
8	A1	Curitiba	N1	Porto Alegre	155	2,46%
9	M	Blumenau	N1	Porto Alegre	140	2,22%
10	C1	Cascavel	J1	Chapecó	137	2,17%
11	T1	Caxias do Sul	A1	Curitiba	113	1,79%
12	G	Florianópolis	N1	Porto Alegre	106	1,68%
13	A1	Curitiba	I	Lages	105	1,67%
14	M	Blumenau	T1	Caxias do Sul	100	1,59%
15	T1	Caxias do Sul	H	Criciúma	93	1,48%
16	L	Joinville	N1	Porto Alegre	92	1,46%
17	A1	Curitiba	G	Florianópolis	79	1,25%
18	C2	Cascavel	L	Joinville	75	1,19%
19	M	Blumenau	S1	Passo Fundo	74	1,17%
20	C1	Cascavel	N1	Porto Alegre	72	1,14%
21	M	Blumenau	C1	Cascavel	67	1,06%
22	M	Blumenau	C2	Cascavel	58	0,92%
23	H	Criciúma	A1	Curitiba	57	0,90%
24	C1	Cascavel	J2	Chapecó	52	0,83%
25	J2	Chapecó	S1	Passo Fundo	52	0,83%
26	A1	Curitiba	S2	Passo Fundo	51	0,81%
27	T1	Caxias do Sul	L	Joinville	47	0,75%
28	C1	Cascavel	U	Santa Cruz do Sul - Lajeado	45	0,71%
29	T1	Caxias do Sul	G	Florianópolis	44	0,70%
30	J2	Chapecó	A2	Curitiba	43	0,68%
31	A1	Curitiba	R1	Ijuí	43	0,68%
32	I	Lages	N1	Porto Alegre	40	0,64%
33	C1	Cascavel	S2	Passo Fundo	40	0,64%
34	T1	Caxias do Sul	I	Lages	40	0,64%
35	J1	Chapecó	A2	Curitiba	37	0,59%
36	C1	Cascavel	L	Joinville	37	0,59%
37	J1	Chapecó	D2	Maringá	36	0,57%
38	J1	Chapecó	N1	Porto Alegre	36	0,57%
39	L	Joinville	S1	Passo Fundo	36	0,57%
40	C1	Cascavel	O1	Pelotas	34	0,54%
41	H	Criciúma	U	Santa Cruz do Sul - Lajeado	33	0,52%
42	J2	Chapecó	N1	Porto Alegre	32	0,51%
43	K	Caçador	A1	Curitiba	30	0,48%
44	D1	Maringá	N1	Porto Alegre	30	0,48%
45	C1	Cascavel	T1	Caxias do Sul	30	0,48%

46	C2	Cascavel	J2	Chapecó	29	0,46%
47	L	Joinville	F1	Ponta Grossa	29	0,46%
48	J1	Chapecó	S2	Passo Fundo	29	0,46%
49	M	Blumenau	D1	Maringá	28	0,44%
50	C1	Cascavel	R2	Ijuí	28	0,44%
51	L	Joinville	D1	Maringá	27	0,43%
52	L	Joinville	D2	Maringá	27	0,43%
53	C2	Cascavel	N1	Porto Alegre	27	0,43%
54	C2	Cascavel	H	Criciúma	26	0,41%
55	J1	Chapecó	B	Guarapuava	26	0,41%
56	J2	Chapecó	F1	Ponta Grossa	26	0,41%
57	L	Joinville	E1	Londrina	26	0,41%
58	M	Blumenau	F1	Ponta Grossa	26	0,41%
59	E1	Londrina	N1	Porto Alegre	26	0,41%
60	A1	Curitiba	O1	Pelotas	26	0,41%
61	M	Blumenau	O1	Pelotas	26	0,41%
62	J1	Chapecó	D1	Maringá	25	0,40%
63	T2	Caxias do Sul	I	Lages	25	0,40%
64	J2	Chapecó	E1	Londrina	24	0,38%
65	H	Criciúma	O1	Pelotas	24	0,38%
66	T1	Caxias do Sul	E1	Londrina	24	0,38%
67	A1	Curitiba	U	Santa Cruz do Sul - Lajeado	24	0,38%
68	A2	Curitiba	L	Joinville	23	0,37%
69	A1	Curitiba	Q1	Uruguaiiana	22	0,35%
70	M	Blumenau	T2	Caxias do Sul	22	0,35%
71	J1	Chapecó	E1	Londrina	21	0,33%
72	H	Criciúma	Q1	Uruguaiiana	21	0,33%
73	C1	Cascavel	S1	Passo Fundo	21	0,33%
74	T1	Caxias do Sul	D1	Maringá	21	0,33%
75	C1	Cascavel	H	Criciúma	20	0,32%
76	J1	Chapecó	F1	Ponta Grossa	20	0,32%
77	J2	Chapecó	D2	Maringá	20	0,32%
78	M	Blumenau	D2	Maringá	20	0,32%
79	H	Criciúma	N2	Porto Alegre	20	0,32%
80	T2	Caxias do Sul	A1	Curitiba	20	0,32%
81	L	Joinville	U	Santa Cruz do Sul - Lajeado	20	0,32%
82	A1	Curitiba	N2	Porto Alegre	19	0,30%
83	A1	Curitiba	P1	Santa Maria	19	0,30%
84	M	Blumenau	S2	Passo Fundo	19	0,30%
85	M	Blumenau	E1	Londrina	18	0,29%
86	F1	Ponta Grossa	N1	Porto Alegre	18	0,29%
87	A1	Curitiba	R2	Ijuí	18	0,29%
88	J1	Chapecó	S1	Passo Fundo	18	0,29%
89	A1	Curitiba	O2	Pelotas	17	0,27%
90	I	Lages	Q1	Uruguaiiana	17	0,27%
91	K	Caçador	S1	Passo Fundo	17	0,27%
92	C1	Cascavel	G	Florianópolis	16	0,25%
93	G	Florianópolis	N2	Porto Alegre	16	0,25%
94	L	Joinville	O1	Pelotas	16	0,25%
95	M	Blumenau	P1	Santa Maria	16	0,25%
96	L	Joinville	Q1	Uruguaiiana	16	0,25%

97	A2	Curitiba	S1	Passo Fundo	16	0,25%
98	S1	Passo Fundo	F1	Ponta Grossa	16	0,25%
99	G	Florianópolis	S1	Passo Fundo	16	0,25%
100	T1	Caxias do Sul	F1	Ponta Grossa	16	0,25%

APÊNDICE C – Potenciais pontos de abastecimento pertencentes ao caminho mais curto de cada par de origem e destino considerado neste trabalho

ID	Origem	Região intermediária correspondente	Destino	Região intermediária correspondente	Pontos pertencentes ao caminho mais curto
1	A1	Curitiba	L	Joinville	A1-L
2	J1	Chapecó	A1	Curitiba	A1-A2-J2-J1
3	M	Blumenau	A1	Curitiba	A1-L-M
4	A1	Curitiba	S1	Passo Fundo	A1-A2-J2-S1
5	H	Criciúma	N1	Porto Alegre	H-N1
6	J2	Chapecó	A1	Curitiba	A1-A2-J2
7	C2	Cascavel	J1	Chapecó	C2-J1
8	A1	Curitiba	N1	Porto Alegre	A1-K-I-T2-N1
9	M	Blumenau	N1	Porto Alegre	M-I-T2-N1
10	C1	Cascavel	J1	Chapecó	C1-J1
11	T1	Caxias do Sul	A1	Curitiba	A1-K-I-T2-T1
12	G	Florianópolis	N1	Porto Alegre	G-H-N1
13	A1	Curitiba	I	Lages	A1-K-I
14	M	Blumenau	T1	Caxias do Sul	M-I-T2-T1
15	T1	Caxias do Sul	H	Criciúma	T1-H
16	L	Joinville	N1	Porto Alegre	L-G-H-N1
17	A1	Curitiba	G	Florianópolis	A1-L-G
18	C2	Cascavel	L	Joinville	C2-A2-L
19	M	Blumenau	S1	Passo Fundo	M-S1
20	C1	Cascavel	N1	Porto Alegre	C1-N2-N1
21	M	Blumenau	C1	Cascavel	C1-B-A2-K-M
22	M	Blumenau	C2	Cascavel	C2-A2-K-M
23	H	Criciúma	A1	Curitiba	A1-L-G-H
24	C1	Cascavel	J2	Chapecó	C1-C2-J2
25	J2	Chapecó	S1	Passo Fundo	J2-S1
26	A1	Curitiba	S2	Passo Fundo	A1-A2-J2-S1-S2
27	T1	Caxias do Sul	L	Joinville	L-T2-T1
28	C1	Cascavel	U	Santa Cruz do Sul - Lajeado	C1-U
29	T1	Caxias do Sul	G	Florianópolis	T1-H-G
30	J2	Chapecó	A2	Curitiba	J2-A2
31	A1	Curitiba	R1	Ijuí	A1-A2-J2-S1-S2-R1
32	I	Lages	N1	Porto Alegre	I-T2-N1
33	C1	Cascavel	S2	Passo Fundo	C1-R1-S2
34	T1	Caxias do Sul	I	Lages	T1-T2-I
35	J1	Chapecó	A2	Curitiba	J1-J2-A2
36	C1	Cascavel	L	Joinville	C1-B-A2-L
37	J1	Chapecó	D2	Maringá	J1-C2-D2
38	J1	Chapecó	N1	Porto Alegre	J1-S1-N2-N1
39	L	Joinville	S1	Passo Fundo	L-M-S1
40	C1	Cascavel	O1	Pelotas	C1-R1-P1-O1
41	H	Criciúma	U	Santa Cruz do Sul - Lajeado	H-N1-N2-U
42	J2	Chapecó	N1	Porto Alegre	J2-S1-N2-N1
43	K	Caçador	A1	Curitiba	K-A1
44	D1	Maringá	N1	Porto Alegre	D1-B-A2-J2-S1-N2-N1
45	C1	Cascavel	T1	Caxias do Sul	C1-T1

46	C2	Cascavel	J2	Chapecó	C2-J2
47	L	Joinville	F1	Ponta Grossa	L-F1
48	J1	Chapecó	S2	Passo Fundo	J1-S1-S2
49	M	Blumenau	D1	Maringá	D1-B-A2-K-M
50	C1	Cascavel	R2	Ijuí	C1-R2
51	L	Joinville	D1	Maringá	L-F1-E1-D1
52	L	Joinville	D2	Maringá	L-F1-E1-D2
53	C2	Cascavel	N1	Porto Alegre	C2-J1-S1-N2-N1
54	C2	Cascavel	H	Criciúma	C2-J2-T2-H
55	J1	Chapecó	B	Guarapuava	J1-J2-A2-B
56	J2	Chapecó	F1	Ponta Grossa	J2-A2-F2-F1
57	L	Joinville	E1	Londrina	L-F1-E1
58	M	Blumenau	F1	Ponta Grossa	M-L-F1
59	E1	Londrina	N1	Porto Alegre	E1-B-A2-J2-S1-N2-N1
60	A1	Curitiba	O1	Pelotas	A1-K-I-T2-N1-O1
61	M	Blumenau	O1	Pelotas	M-I-T2-N1-O1
62	J1	Chapecó	D1	Maringá	J1-C2-D2-D1
63	T2	Caxias do Sul	I	Lages	T2-I
64	J2	Chapecó	E1	Londrina	J2-A2-B-E1
65	H	Criciúma	O1	Pelotas	H-N1-O1
66	T1	Caxias do Sul	E1	Londrina	T1-J2-A2-B-E1
67	A1	Curitiba	U	Santa Cruz do Sul - Lajeado	A1-K-I-T2-T1-U
68	A2	Curitiba	L	Joinville	A2-L
69	A1	Curitiba	Q1	Uruguaiana	A1-A2-J2-S1-S2-P2-Q1
70	M	Blumenau	T2	Caxias do Sul	M-I-T2
71	J1	Chapecó	E1	Londrina	J1-J2-A2-B-E1
72	H	Criciúma	Q1	Uruguaiana	H-N1-Q1
73	C1	Cascavel	S1	Passo Fundo	C1-S1
74	T1	Caxias do Sul	D1	Maringá	T1-J2-A2-B-D1
75	C1	Cascavel	H	Criciúma	C1-C2-J2-T2-H
76	J1	Chapecó	F1	Ponta Grossa	J1-J2-A2-F2-F1
77	J2	Chapecó	D2	Maringá	J2-A2-B-D2
78	M	Blumenau	D2	Maringá	M-K-A2-B-D2
79	H	Criciúma	N2	Porto Alegre	H-N1-N2
80	T2	Caxias do Sul	A1	Curitiba	T2-I-K-A1
81	L	Joinville	U	Santa Cruz do Sul - Lajeado	L-T2-T1-U
82	A1	Curitiba	N2	Porto Alegre	A1-K-I-T2-T1-N2
83	A1	Curitiba	P1	Santa Maria	A1-A2-J2-S1-S2-P1
84	M	Blumenau	S2	Passo Fundo	M-S1-S2
85	M	Blumenau	E1	Londrina	M-L-F1-E1
86	F1	Ponta Grossa	N1	Porto Alegre	F1-K-I-T2-N1
87	A1	Curitiba	R2	Ijuí	A1-A2-J2-J1-R2
88	J1	Chapecó	S1	Passo Fundo	J1-S1
89	A1	Curitiba	O2	Pelotas	A1-A2-J2-S1-S2-P1-O2
90	I	Lages	Q1	Uruguaiana	I-T2-S1-S2-P2-Q1
91	K	Caçador	S1	Passo Fundo	K-S1
92	C1	Cascavel	G	Florianópolis	C1-B-A2-L-G
93	G	Florianópolis	N2	Porto Alegre	G-H-N1-N2

94	L	Joinville	O1	Pelotas	L-G-H-N1-O1
95	M	Blumenau	P1	Santa Maria	M-S1-S2-P1
96	L	Joinville	Q1	Urugaiana	L-M-S1-S2-P2-Q1
97	A2	Curitiba	S1	Passo Fundo	A2-J2-S1
98	S1	Passo Fundo	F1	Ponta Grossa	S1-J2-A2-F2-F1
99	G	Florianópolis	S1	Passo Fundo	G-T2-S1
100	T1	Caxias do Sul	F1	Ponta Grossa	T1-J2-A2-F2-F1

APÊNDICE D – Soluções ótimas obtidas para veículos com 400 km de autonomia

p	Autonomia = 400 km	
	Fluxo atendido (%)	Solução ótima
1	13,1%	L
2	23,4%	A1, J2
3	28,6%	A1, J2, L
4	32,2%	A1, C2, J2, L
5	37,0%	A1, I, J2, M, N1
6	42,9%	A1, H, I, J2, L, N1
7	46,0%	A1, C2, I, J2, M, N1, T2
8	53,6%	A1, H, I, J2, L, M, N1, T1
9	60,9%	A1, G, H, I, J2, M, N1, S1, T1
10	65,0%	A1, C2, G, H, I, J2, M, N1, S1, T1
11	67,4%	A1, C2, F1, G, H, I, J2, M, N1, S1, T1
12	69,2%	A1, C2, F1, G, H, I, J2, M, N1, O1, S1, T1
13	70,8%	A1, A2, C2, F1, G, H, I, J2, M, N1, O1, S1, T1
14	75,3%	A1, A2, C1, C2, F1, G, H, I, J2, L, M, N1, S1, T1
15	78,2%	A1, A2, C1, C2, E1, F1, G, H, I, J2, L, M, N1, S1, T1
16	80,9%	A1, A2, C1, C2, E1, F1, G, H, I, J1, J2, L, M, N1, S1, T1
17	82,7%	A1, A2, C1, C2, E1, F1, G, H, I, J1, J2, L, M, N1, O1, S1, T1
18	84,7%	A1, A2, C1, C2, D2, E1, F1, G, H, I, J1, J2, L, M, N1, O1, S1, T1
19	85,9%	A1, A2, C1, C2, D2, E1, F1, G, H, I, J1, J2, L, M, N1, O1, S1, T1, T2
20	86,2%	A1, A2, C1, C2, D2, E1, F1, G, H, I, J1, J2, L, M, N1, O1, S1, S2, T1, T2
21	86,6%	A1, A2, B, C1, C2, D1, D2, E1, F1, G, H, I, J1, J2, L, M, N1, O1, R2, S1, T1
22	86,6%	A1, A2, C1, C2, D1, D2, E1, F1, G, H, I, J1, J2, K, L, M, N1, O1, P1, S1, T1, T2
23	88,5%	A1, A2, B, C1, C2, D1, D2, E1, F1, G, H, J1, J2, K, L, M, N1, O1, R2, S1, S2, T1, T2
24	88,9%	A1, A2, B, C1, C2, D1, D2, E1, F1, G, H, J1, J2, K, L, M, N1, O1, P1, P2, Q1, S1, T1, T2
25	89,2%	A1, A2, B, C1, C2, D1, D2, E1, F1, G, H, J1, J2, K, L, M, N1, O1, P2, Q1, R2, S1, S2, T1, T2
26	89,6%	A1, A2, B, C1, C2, D1, D2, E1, F1, G, H, J1, J2, K, L, M, N1, O1, O2, P1, P2, Q1, R2, S1, T1, T2
27	89,6%	Sem incremento de fluxo até $p = 34$.

APÊNDICE E – Soluções ótimas obtidas para veículos com 600 km de autonomia

p	Autonomia = 600 km	
	Fluxo atendido (%)	Solução ótima
1	14,6%	L
2	30,0%	A1, J2
3	39,0%	A1, J2, T2
4	49,1%	A1, H, J2, T2
5	58,6%	A1, G, I, J2, N1
6	64,1%	A1, G, I, J1, J2, N1
7	68,4%	A1, A2, G, I, J1, J2, N1
8	74,4%	A1, A2, C1, G, I, J1, J2, N1
9	78,0%	A1, A2, C1, G, H, I, J1, J2, N1
10	82,7%	A2, C1, E1, H, I, J1, J2, K, L, N1
11	85,6%	A2, C1, E1, H, I, J1, J2, K, L, N1, T1
12	89,5%	A2, C1, C2, E1, H, J1, K, L, M, N1, S1, T2
13	91,1%	A2, C1, C2, D1, E1, H, J1, K, L, M, N1, S1, T2
14	92,6%	A2, C1, C2, D1, E1, G, J1, K, L, M, N1, S1, T1, T2
15	94,0%	A2, C1, C2, D1, E1, G, J1, K, L, M, N1, Q1, S1, T1, T2
16	94,8%	A2, C1, C2, D1, D2, E1, G, J1, K, L, M, N1, Q1, S1, T1, T2
17	95,6%	A2, C1, C2, D1, D2, E1, G, J1, K, L, M, N1, Q1, S1, S2, T1, T2
18	96,6%	A2, C1, C2, D1, D2, E1, G, J1, K, L, M, N1, P1, Q1, R1, S1, T1, T2
19	96,8%	A2, B, C1, C2, D1, E1, G, J1, K, L, M, N1, O1, Q1, R1, R2, S1, T1, T2
20	97,1%	A2, B, C1, C2, D1, E1, G, J1, K, L, M, N1, O1, P1, Q1, R1, R2, S1, T1, T2
21	97,1%	Sem incremento de fluxo até $p = 34$.

APÊNDICE F – Soluções ótimas obtidas para veículos com 800 km de autonomia

p	Autonomia = 800 km	
	Fluxo atendido (%)	Solução ótima
1	23,4%	A2
2	39,1%	A1, A2
3	53,0%	A1, A2, T2
4	65,6%	A1, A2, H, T2
5	72,5%	A1, A2, H, J1, T2
6	78,3%	A2, H, I, J1, L, S1
7	81,5%	A2, C1, C2, H, I, L, S1
8	84,2%	A2, C1, C2, H, I, L, S1, T1
9	86,7%	A2, C1, C2, D1, H, I, L, S1, T1
10	88,4%	A2, C1, C2, D1, F1, H, I, L, S1, T1
11	90,6%	A2, C1, C2, D1, H, I, L, M, N1, S1, T1
12	92,4%	A2, C1, C2, D1, F1, H, I, L, M, N1, S1, T1
13	93,4%	A2, C1, C2, D1, E1, H, I, L, M, N1, N2, S1, T1
14	94,8%	A2, C1, C2, D1, F1, H, I, L, M, N1, P1, Q1, S1, T1
15	95,7%	A2, C1, C2, D1, F1, H, I, L, M, O1, P2, R1, S1, T1, U
16	96,6%	A1, A2, C1, C2, D1, F1, H, L, M, O1, P2, R1, S1, T1, T2, U
17	98,2%	B, C1, C2, E1, H, J2, K, L, M, N2, O1, P2, R1, R2, S1, T2, U
18	99,7%	A2, C1, C2, D1, F1, H, K, L, M, N2, O1, Q1, R1, R2, S1, T1, T2, U
19	100,0%	A2, C1, C2, D1, F1, H, K, L, M, N2, O1, O2, Q1, R1, R2, S1, T1, T2, U
20	100,0%	Sem incremento de fluxo até $p = 34$.