



Gabriele Schuster Gollmann

**OTIMIZAÇÃO DE ROTAS E GESTÃO DE CUSTOS NO TRANSPORTE
RODOVIÁRIO DE CARGAS: UMA ANÁLISE DO CAMINHO MÍNIMO PARA UM
MOTORISTA AUTÔNOMO**

Horizontalina - RS

2025

Gabriele Schuster Gollmann

**OTIMIZAÇÃO DE ROTAS E GESTÃO DE CUSTOS NO TRANSPORTE
RODOVIÁRIO DE CARGAS: UMA ANÁLISE DO CAMINHO MÍNIMO PARA UM
MOTORISTA AUTÔNOMO**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Produção na Faculdade Horizontina, sob a orientação da Prof^a. Ivete Ruppenthal Ebrin.

Horizontina - RS

2025

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

**“Otimização de rotas e gestão de custos no transporte rodoviário de cargas:
Uma análise do caminho mínimo para um motorista autônomo.”**

**Elaborada por:
Gabriele Schuster Gollmann**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Produção

Aprovado em: 03/12/2025
Pela Comissão Examinadora

Mestra. Ivete Ruppenthal Ebrin
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

Mestra. Eliane Garlet
FAHOR – Faculdade Horizontina

Mestra. Francine Centenaro Gomes
FAHOR – Faculdade Horizontina

**Horizontina - RS
2025**

Dedico este trabalho ao meu pai, que com generosidade abriu seu caminho para que eu pudesse trilhar o meu, e à minha mãe, cuja força e dedicação sempre sustentaram os meus passos. Tudo o que eu conquistei carrega um pedaço de vocês. Obrigada por tudo!

RESUMO

A crescente necessidade de reduzir custos e aprimorar a eficiência no transporte rodoviário de cargas torna indispensável a adoção de ferramentas capazes de orientar decisões estratégicas. Assim, o objetivo geral da pesquisa foi desenvolver um modelo de otimização, baseado em programação linear, para auxiliar na escolha das rotas mais eficientes, visando a redução de custos operacionais e aumento da eficiência no transporte rodoviário de cargas de um motorista autônomo atuante no Rio Grande do Sul. A metodologia adotada é uma abordagem mista, integrando métodos quantitativos e qualitativos. Quanto aos objetivos, é uma pesquisa de natureza exploratória e descritiva, permitindo tanto o aprofundamento inicial do tema quanto a caracterização detalhada dos elementos analisados. Em relação aos procedimentos técnicos, trata-se de um estudo de caso associado a uma pesquisa comparativa, possibilitando examinar a realidade do motorista e confrontar a situação atual com os resultados gerados pela otimização. A coleta de dados se deu por meio de pesquisa bibliográfica, documental e entrevistas. Buscou-se identificar os principais fatores que influenciam a estrutura de custos dessa atividade, abrangendo despesas variáveis, fixas e indiretas, bem como, descrever as rotas atualmente percorridas, com seus respectivos impactos financeiros. Os dados foram analisados considerando quilometragem, consumo de combustível, manutenção, pedágios e tempo de viagem, possibilitando comparar os trajetos praticados pelo motorista com aqueles gerados pelo modelo. Os resultados evidenciam que o combustível é o principal componente de custo e que a adoção de rotas otimizadas tem potencial para gerar economia operacional significativa ao longo do tempo. Embora a redução por viagem varie entre 1,4% e 6,4%, esses percentuais, quando acumulados em múltiplos deslocamentos, representam um impacto financeiro relevante para a operação. A pesquisa demonstra que a utilização de ferramentas matemáticas favorece decisões mais precisas, amplia a compreensão dos custos totais e contribui para a sustentabilidade econômica da atividade autônoma. Conclui-se que a aplicação de modelos de otimização é viável, acessível e potencialmente benéfica para motoristas autônomos, especialmente em contextos de elevada variabilidade nos custos do transporte.

Palavras-chave: Otimização de rotas. Gestão de Custos Operacionais. Programação linear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Grafo para determinação do caminho mínimo	22
Figura 2: Fluxograma do trabalho de pesquisa	33
Figura 3: Fluxograma do processo de carregamento e descarregamento	38
Figura 4: Percentual relativo de cada categoria	41
Figura 5: Variação mensal do preço do óleo diesel no Rio Grande do Sul (jul/2024 – jun/2025)	42
Figura 6: Rota entre Crissiumal (RS) x Rio Grande (RS)	46
Figura 7: Rota entre Cruz Alta (RS) x São Gabriel do Oeste (MS).....	47
Figura 8: Rota entre Rio Grande (RS) x Sete Quedas (MS)	48
Figura 9: Rota entre Antônio João (MS) à Nova Candelária (RS)	48
Figura 10: Rota entre Crissiumal (RS) x Cruz Alta (RS).....	49
Figura 11: Configuração do <i>Solver</i>	62
Figura 12: Estrutura do modelo no <i>Excel</i>	63
Figura 13: Grafo representando a rota ótima determinada pelo <i>Solver</i>	65
Figura 14: Grafo da rota Cruz Alta (RS) à São Gabriel do Oeste (MS)	69
Figura 15: Grafo da rota Rio Grande (RS) à Sete Quedas (MS)	70
Figura 16: Grafo da rota Antônio João (MS) à Nova Candelária (RS).....	71
Figura 17: Grafo da rota de Crissiumal (RS) à Cruz Alta (RS)	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Custos variáveis da operação	40
Tabela 2: Custos fixos da operação	43
Tabela 3: Cálculo da depreciação	43
Tabela 4: Custos indiretos da operação	44
Tabela 5: Rotas mapeadas	46
Tabela 6: Distâncias, custo médio e tempo de viagem	50
Tabela 7: Dados médios de rendimento do veículo	52
Tabela 8: Custos associados ao transporte por KM rodado.....	53
Tabela 9: Levantamento das possíveis rotas entre a origem e o destino final	55
Tabela 10: Numeração dos nós correspondentes às cidades.....	56
Tabela 11: Ligações diretas e distâncias entre os nós.....	57
Tabela 12: Consolidação dos dados para o cálculo do custo total de cada rota	59
Tabela 13: Distâncias e custos totais das rotas	67
Tabela 14: Comparativo entre custos totais atuais e otimizados.....	73
Tabela 15: Resultados dos testes de sensibilidade dos custos totais.....	76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 TEMA	10
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA	10
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA	10
1.4 JUSTIFICATIVA.....	11
1.5 OBJETIVOS	12
1.5.1 Objetivo geral.....	13
1.5.2 Objetivos específicos.....	13
2 REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1 FUNDAMENTOS E CONCEITOS DA LOGÍSTICA	14
2.1.1 Objetivos da logística.....	15
2.1.2 Componentes da logística	15
2.2 GESTÃO DE CUSTOS NO TRANSPORTE	16
2.2.1 Categorização e Análise de Custos no Transporte de Cargas	18
2.3 PESQUISA OPERACIONAL	19
2.3.1 Otimização de rotas no transporte de cargas	19
2.3.2 O problema do caminho mínimo	21
2.4 TECNOLOGIAS E INOVAÇÕES NO TRANSPORTE	22
2.4.1 Análise de Custo-Benefício na Implementação de Sistemas de Otimização de Rotas	23
2.4.2 Tendências no Transporte Logístico: Logística 4.0 e Oportunidades	24
3 METODOLOGIA.....	27
3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS	27
3.1.1 Métodos de abordagem	28
3.1.2 Objetivos da pesquisa.....	28
3.1.3 Métodos de procedimentos técnicos.....	29
3.1.4 Técnicas de coletas de dados	30
3.1.5 Técnicas de análise de dados	31
3.1.6 Local da pesquisa.....	31
3.1.7 Sujeito da pesquisa	32
3.1.8 Etapas das atividades	32
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	35
4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	35
4.1.1 Caracterização do problema.....	36
4.1.2 Mapeamento dos processos	37
4.2 IDENTIFICAÇÃO DOS CUSTOS OPERACIONAIS	39
4.2.1 Custos variáveis	39
4.2.2 Custos fixos	42
4.2.3 Custos indiretos	44
4.3 LEVANTAMENTO DAS ROTAS ATUAIS E SEUS CUSTOS ASSOCIADOS	45
4.3.1 Descrição das rotas atuais	45
4.3.2 Distâncias, tempo de viagem e custos	50
4.4 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS MATEMÁTICOS	51
4.4.1 Levantamento de custos por quilômetro rodado	51
4.4.2 Levantamento das possíveis rotas	54
4.4.3 Representação das cidades em nós e definição das ligações da rede	56

4.4.4 Levantamento dos custos por rota	58
4.4.5 Análise comparativa dos custos totais	72
4.4.6 Testes de sensibilidade e validação do modelo	75
CONCLUSÃO	78
REFERÊNCIAS.....	80
APÊNDICE A - CUSTOS OPERACIONAIS.....	88
APÊNDICE B - DEFINIÇÃO DO FLUXO LÍQUIDO DE CADA NÓ	92

1 INTRODUÇÃO

A logística de transporte é uma das áreas estratégicas mais relevantes da gestão da cadeia de suprimentos, sendo essencial para assegurar o fluxo eficiente de mercadorias entre fornecedores, distribuidores e consumidores finais. No Brasil, o modal rodoviário se destaca como principal meio de escoamento de cargas, o que evidencia a necessidade de uma gestão eficiente nesse setor para garantir competitividade, reduzir custos e aumentar a produtividade nas operações logísticas (Bowersox *et al.*, 2014).

Nesse contexto, a gestão de custos torna-se um fator crucial para a competitividade, impactando diretamente os resultados da logística. A otimização de rotas, por sua vez, é uma estratégia fundamental para eliminar custos e maximizar a produtividade, contribuindo não apenas para a redução de desperdícios, mas também para a melhoria da qualidade do serviço prestado (Lucchesi, 2024).

Inserido nessa realidade logística, destaca-se o papel dos motoristas autônomos, que atuam de forma independente no transporte rodoviário de cargas e representam uma parcela significativa da estrutura logística nacional. Para manter sua sustentabilidade econômica, esses profissionais enfrentam diversos desafios, como altos custos com combustível, manutenção, pedágios e a perda de receitas devido à falta de carga para retorno (Paulino *et al.*, 2023).

Apesar de sua relevância, os motoristas autônomos geralmente não contam com ferramentas adequadas de gestão ou com suporte técnico que os auxilie na tomada de decisões mais eficazes. Dessa forma, torna-se imprescindível o desenvolvimento de estratégias que considerem suas condições reais de trabalho e ofereçam soluções práticas e acessíveis para reduzir custos e aumentar a eficiência.

Além disso, a maioria das pesquisas acadêmicas relacionadas à gestão de custos e otimização de rotas concentra-se em grandes transportadoras, com maior acesso a tecnologias. Há uma escassez significativa de estudos voltados à realidade dos motoristas autônomos, que atuam em contextos operacionais muito distintos e com infraestrutura limitada.

Diante desse panorama, a presente pesquisa tem como foco um motorista autônomo que atua no transporte rodoviário de cargas no estado do Rio Grande do Sul. O profissional utiliza um caminhão Volvo FH 380, com capacidade para 38

toneladas, e realiza principalmente o transporte de grãos e fertilizantes. Suas rotas abrangem deslocamentos dentro do estado do Rio Grande do Sul, incluindo trajetos entre Rio Grande do Sul e Mato Grosso do Sul. O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um modelo de otimização, baseado em programação linear, para auxiliar um motorista na definição de rotas mais eficientes, com foco na redução de custos operacionais e no aumento da eficiência no transporte rodoviário de cargas no estado do Rio Grande do Sul.

1.1 TEMA

O tema deste estudo foi a otimização de rotas e análise de custos para redução de custos operacionais de motorista autônomo no transporte rodoviário de cargas.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A delimitação do tema desta pesquisa concentra-se no desenvolvimento e aplicação de um modelo de otimização de rotas, utilizando programação linear para redução de custos operacionais de um motorista autônomo no transporte rodoviário de cargas, com estudo de caso realizado no estado do Rio Grande do Sul, de julho/2025 à junho/2025.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

O transporte rodoviário de cargas no Brasil tem se tornado cada vez mais desafiador para motoristas autônomos. O aumento contínuo dos custos com combustível, manutenção, pedágios e seguros, aliado à complexidade das rotinas operacionais, pressiona diretamente a rentabilidade desses profissionais, que muitas vezes trabalham sozinhos, com recursos limitados e pouca estrutura de apoio.

Muitos não contam com ferramentas que os ajudem a planejar melhor suas rotas, tomar decisões estratégicas ou evitar trajetos ineficientes - o que acaba gerando desperdício de tempo, dinheiro e até oportunidades de carga. No Rio Grande do Sul, essa situação não é diferente: os desafios são os mesmos e impactam diretamente a viabilidade do trabalho autônomo no setor.

Diante desse cenário, a programação linear surge como uma alternativa promissora. Por meio dela, é possível planejar rotas de forma mais inteligente,

considerando variáveis como custos, tempo e aproveitamento da carga. Apesar do potencial, ainda são poucos os motoristas autônomos que têm acesso ou conhecimento suficiente para utilizar esse tipo de ferramenta no dia a dia.

Assim, a pesquisa busca responder: Como a aplicação de um modelo de otimização baseado no problema do caminho mínimo pode reduzir os custos operacionais e aumentar a rentabilidade do motorista autônomo?

1.4 JUSTIFICATIVA

De acordo com o Plano Nacional de Logística (EPL, 2018), o Brasil apresenta uma forte dependência do modal rodoviário, responsável por aproximadamente 65% do total de cargas transportadas no país. Essa concentração evidencia a importância dos motoristas autônomos, que desempenham um papel estratégico na integração logística nacional ao garantir o escoamento de mercadorias para as mais diversas regiões (Almeida *et al.*, 2020).

Apesar de sua relevância, esses profissionais enfrentam obstáculos significativos, especialmente no que se refere à gestão de custos e à otimização de rotas. De acordo com Okada (2019), a lucratividade dos caminhoneiros autônomos está fortemente associada à escolha eficiente dos trajetos e à possibilidade de realizar viagens de retorno com carga. A ausência de um planejamento adequado pode levar ao aumento dos custos operacionais, especialmente quando ocorrem deslocamentos vazios, impactando negativamente na rentabilidade das operações.

Além disso, como apontam Gonçalves e Silva (2012), muitos motoristas independentes ainda tomam decisões baseadas unicamente na experiência prática, sem o apoio de ferramentas sistematizadas de controle de custos. Essa limitação reduz as possibilidades de identificar estratégias mais eficazes para atender à demanda com menor custo, mantendo esses profissionais em um cenário de vulnerabilidade econômica.

Diante dessa realidade, torna-se evidente a necessidade de soluções que contribuam para decisões mais estratégicas por parte dos motoristas. Nesse sentido, o desenvolvimento de um modelo de otimização de rotas baseado em programação linear surge como uma alternativa viável, considerando variáveis como combustível,

pedágios e manutenção, e promovendo uma gestão mais eficiente das operações de transporte.

Assim, a realização deste estudo justifica-se pela necessidade de aprimorar o processo de tomada de decisão de motoristas autônomos no transporte rodoviário de cargas, especialmente no que se refere à escolha das rotas mais eficientes. Observa-se que, na prática, muitos profissionais definem seus trajetos com base apenas na experiência pessoal ou nos custos mais visíveis, como combustível e manutenção imediata, que é o caso deste estudo. Essa limitação no entendimento dos gastos totais pode levar a escolhas que não representam, necessariamente, a melhor alternativa em termos de eficiência logística. Ao aplicar um modelo de otimização de rotas, o estudo busca fornecer uma ferramenta objetiva que permita avaliar, de forma mais precisa, quais trajetos realmente minimizam os custos ao longo da operação.

Além disso, a pesquisa se torna relevante porque evidencia custos que frequentemente passam despercebidos, como depreciação do veículo, pedágios, desgaste de componentes e despesas administrativas. Quando não considerados, esses fatores podem comprometer a sustentabilidade econômica da atividade, impactando diretamente a margem de lucro do motorista autônomo. Ao integrar todos os custos operacionais e patrimoniais em uma análise, o estudo oferece uma visão mais ampla da realidade financeira envolvida, contribuindo para decisões mais estratégicas. Dessa forma, a investigação não apenas confirma a eficiência das rotas praticadas, mas também fortalece o planejamento logístico e financeiro do profissional.

1.5 OBJETIVOS

Os objetivos representam um componente fundamental na estrutura de uma pesquisa científica, pois estabelecem com clareza os propósitos que se pretende alcançar ao longo do estudo. Constituem-se como diretrizes que orientam o percurso metodológico, auxiliando na delimitação do problema, na definição das estratégias de investigação e na interpretação dos resultados (Gil, 2019).

1.5.1 Objetivo geral

Desenvolver um modelo de otimização, baseado em programação linear, para selecionar as rotas mais eficientes, reduzindo custos operacionais e aumentando a eficiência do transporte rodoviário de cargas de um motorista autônomo no Rio Grande do Sul.

1.5.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos traduzem o propósito geral em metas concretas e mensuráveis, definindo etapas claramente delimitadas que facilitam a execução e o acompanhamento do estudo. Essa diferenciação contribui para um desenvolvimento mais organizado e consistente da pesquisa (Marconi; Lakatos 2023). A seguir, constam os objetivos específicos do presente estudo:

- Identificar os principais fatores que influenciam os custos operacionais relacionados às rotas utilizadas;
- Realizar o levantamento detalhado das rotas atualmente utilizadas e dos respectivos custos operacionais;
- Desenvolver um modelo matemático de otimização de rotas utilizando programação linear para reduzir os custos operacionais;
- Aplicar o modelo de otimização às rotas reais do motorista autônomo para propor rotas mais eficientes;
- Validar o modelo proposto por meio da comparação entre os custos operacionais atuais e os custos estimados com as rotas otimizadas;
- Analisar o impacto da aplicação do modelo na eficiência operacional e na redução dos custos no transporte rodoviário de cargas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta os principais conteúdos que fundamentam a análise proposta neste estudo. Inicia-se com a abordagem dos conceitos e fundamentos da logística, incluindo seus objetivos e componentes. Em seguida, são discutidos os aspectos relacionados à gestão de custos no transporte rodoviário de cargas, com detalhamento da categorização e análise dos custos operacionais.

Na sequência, o capítulo trata da pesquisa operacional, com foco na aplicação da programação linear e na modelagem de problemas logísticos, como o problema do caminho mínimo. Posteriormente, são abordadas as tecnologias e inovações aplicadas ao transporte, com destaque para a análise de custo-benefício na implementação de sistemas de otimização de rotas e as tendências relacionadas à Logística 4.0. Cada uma dessas seções contribui para contextualizar teoricamente a proposta de otimização desenvolvida ao longo do trabalho.

2.1 FUNDAMENTOS E CONCEITOS DA LOGÍSTICA

A logística é uma função estratégica nas organizações, encarregada de planejar, implementar e controlar o fluxo de produtos, serviços e informações desde a origem até o consumo, com foco em eficiência e efetividade. Segundo Carvalho e Ribeiro (2012), ela desempenha um papel crucial na gestão da rede de suprimentos, influenciando diretamente o desempenho competitivo das organizações. Integrar atividades como transporte, armazenagem, controle de estoques e processamento de pedidos é fundamental para garantir agilidade e qualidade no atendimento ao cliente.

A evolução da logística tem sido impulsionada por fatores como a globalização, os avanços tecnológicos e as mudanças nas expectativas dos consumidores. De acordo com Corrêa, Sampaio e Barros (2020), a logística moderna vai além das operações tradicionais, exigindo a coordenação de processos internos e a adaptação constante às dinâmicas do mercado. O uso de tecnologias da informação e comunicação amplia a visibilidade e o controle dos processos logísticos, tornando as decisões mais assertivas e as respostas ao mercado mais ágeis.

A sustentabilidade passou a ocupar um papel central na logística, com foco na minimização dos impactos ambientais e na adoção de práticas mais conscientes. Segundo Rodrigues e Fiorini (2021), a logística sustentável busca equilibrar o

desempenho logístico com a responsabilidade social e ambiental, adotando medidas como a otimização de rotas, o uso de veículos menos poluentes e a gestão adequada de resíduos

2.1.1 Objetivos da logística

A logística desempenha um papel estratégico na eficiência operacional e na competitividade organizacional. Seus objetivos centram-se na otimização dos processos, na eliminação de desperdícios e na melhoria contínua dos serviços prestados. Além de integrar os diversos agentes da cadeia produtiva - fornecedores, fabricantes, distribuidores e consumidores -, a logística assegura fluidez, sincronia e confiabilidade às operações (Carvalho; Ribeiro, 2012).

Um dos principais desafios é encontrar o equilíbrio entre os custos logísticos e o nível de serviço oferecido. Essa relação é fundamental para a sustentabilidade financeira, exigindo decisões orientadas por dados e a constante revisão de processos. O objetivo é minimizar despesas sem comprometer a qualidade do atendimento, evitando também excessos que possam reduzir a rentabilidade da operação (Rosa *et al.* 2019).

A logística também impulsiona a inovação incremental e a cultura de melhoria contínua, essenciais em um ambiente de constantes mudanças. Sua capacidade de adaptação permite que as organizações se antecipem às demandas do mercado e respondem com agilidade a novas situações (Senne; Lima 2020).

Por fim, a logística torna-se um diferencial competitivo, contribuindo para agregar valor à marca e para fortalecer a experiência do cliente. Quando alinhada à estratégia empresarial, ultrapassa a função de apenas reduzir custos, promovendo um atendimento mais eficiente e ampliando a presença da empresa no mercado (Souza, 2021).

2.1.2 Componentes da logística

Os componentes da logística correspondem às atividades e processos que, integrados, garantem o funcionamento eficiente da rede de suprimentos. Entre os principais elementos estão o transporte, o armazenamento, o gerenciamento de estoques, o processamento de pedidos e o atendimento ao cliente. Esses

componentes constituem o núcleo operacional da logística, sendo responsáveis por assegurar que os produtos e serviços sejam entregues no prazo e em condições adequadas (Souza, 2021).

O transporte é considerado um dos componentes mais importantes da logística, pois conecta fornecedores, produtores e consumidores por meio de diversos modais, como rodoviário, ferroviário, aéreo e marítimo. De acordo com Senne e Lima (2020), a escolha do modal logístico deve considerar fatores como custo, tempo de entrega, capacidade de carga e efeitos sobre o meio ambiente, visando à eficiência e à sustentabilidade das operações.

Outro elemento essencial é o gerenciamento de estoques, que envolve o planejamento e o controle dos níveis de materiais mantidos em depósito para atender à demanda do mercado. Uma gestão eficiente de estoques permite reduzir custos com armazenagem, evitar rupturas no fornecimento e melhorar o nível de atendimento ao consumidor, garantindo maior competitividade para as organizações (Rosa *et al.*, 2019).

Além disso, o processamento de pedidos e o atendimento ao cliente completam os principais componentes da logística, sendo responsáveis pela comunicação eficiente entre empresa e consumidor. Como destaca Souza (2021), esses processos impactam diretamente na satisfação do cliente, uma vez que garantem a precisão nas entregas e o suporte necessário para resolver eventuais problemas. A integração eficiente entre todos esses componentes é fundamental para o sucesso dos processos logísticos.

2.2 GESTÃO DE CUSTOS NO TRANSPORTE

A gestão de custos no transporte é fundamental para melhorar o desempenho competitivo das organizações logísticas. Controlar eficientemente os custos exige a identificação clara dos gastos diretos e indiretos associados às operações de transporte, permitindo um planejamento mais eficaz e a melhor utilização dos recursos. Entre esses custos, destacam-se os relacionados à manutenção da frota, ao combustível e à mão de obra, todos com impacto direto na lucratividade (Azevedo, 2021).

Ademais, o desenvolvimento de modelos de otimização possibilita uma gestão mais eficiente dos custos, especialmente na escolha de rotas e no planejamento das operações, reduzindo gastos com combustível e tempo de entrega (Azevedo, 2021). A adoção de soluções que integrem planejamento operacional e análise de rotas é essencial para aumentar a eficiência e manter a competitividade das empresas do setor.

Cavalcante e Marcos (2021) destacam que os desafios na gestão de transporte envolvem a necessidade de equilibrar custos e sustentabilidade. As práticas sustentáveis, como o uso de veículos menos poluentes e a racionalização de trajetos, são apontadas como estratégias que, além de reduzir impactos ambientais, também minimizam despesas operacionais.

Nesse contexto, a importância de alinhar a gestão de despesas à busca por práticas sustentáveis, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, torna-se cada vez mais evidente. A adoção de processos que evitem desperdícios e o consumo excessivo de recursos contribui para agregar valor aos serviços logísticos, ao mesmo tempo em que reforça o compromisso com o meio ambiente – fator cada vez mais relevante na competitividade do setor (Cavalcante; Marcos, 2021).

Já Jimenez e Gasparetto (2020) evidenciam que as empresas que implementam práticas sistemáticas de gestão de custos logísticos conseguem maior controle financeiro e operacional. A adoção de ferramentas analíticas permite mapear custos ocultos e identificar oportunidades de economia, especialmente em empresas industriais de grande porte.

Complementando essa visão, a implementação de sistemas de monitoramento e controle favorece a análise detalhada das despesas logísticas. Com uma visão integrada dos custos, torna-se possível tomar decisões mais precisas sobre a alocação de recursos, a escolha de rotas e o uso de modais, o que impacta positivamente o desempenho operacional (Jimenez; Gasparetto, 2020).

Por fim, uma gestão de custos eficaz demanda postura proativa, com constante revisão das estratégias diante de variáveis externas como flutuações nos preços dos combustíveis ou alterações regulatórias. O uso de modelos matemáticos e ferramentas tecnológicas de apoio ao planejamento financeiro é essencial para

enfrentar tais desafios e manter a eficiência nos processos logísticos (De Azevedo *et al.*, 2019).

2.2.1 Categorização e Análise de Custos no Transporte de Cargas

A categorização dos custos no transporte de cargas é fundamental para uma gestão eficiente e estratégica. Segundo Matos e Bassan (2021), os custos podem ser classificados em fixos, como salários e depreciação de veículos, e variáveis, como combustível e manutenção. Essa distinção permite uma análise mais precisa do desempenho financeiro e operacional das empresas de transporte.

Ainda, é essencial compreender a distinção entre custos fixos e custos variáveis para uma análise financeira mais precisa das operações logísticas. Os custos fixos são aqueles que permanecem constantes independentemente do volume de atividades, como aluguel, salários administrativos e seguros. Já os custos variáveis estão diretamente relacionados ao nível de produção ou de serviços prestados, como combustível, manutenção por quilometragem e horas extras dos motoristas. Essa separação permite identificar com maior clareza os pontos de maior impacto financeiro nas operações e facilita o planejamento orçamentário e a tomada de decisões estratégicas (Catiano; Pereira, 2018).

A análise detalhada das despesas operacionais é essencial para a formação de preços competitivos. Uma metodologia adequada de custeio contribui significativamente para a definição de preços justos de frete, considerando todos os elementos que impactam os custos totais, como distância percorrida, tipo de carga e condições das vias (Santos, 2014).

Os pequenos transportadores lidam com desafios particulares quando se trata de gerenciar custos e definir preços de frete de forma competitiva. Diante das limitações operacionais e financeiras comuns nesse segmento, é essencial adotar práticas de gestão adaptadas à sua realidade. Ferramentas simples, porém, eficientes, podem ser fundamentais para garantir o controle financeiro e a viabilidade do negócio a longo prazo (Leite; Junior, 2021).

Além disso, a aplicação de métodos como a análise custo-volume-lucro (CVL) permite uma compreensão mais aprofundada sobre a relação entre custos, volume transportado e resultado financeiro. Luiz *et al.* (2018) demonstram que o uso dessa

análise em agenciadoras de transporte facilita a identificação do ponto de equilíbrio e da margem de segurança, elementos fundamentais para avaliar a viabilidade e a sustentabilidade dos processos logísticos.

2.3 PESQUISA OPERACIONAL

A Pesquisa Operacional (PO) é uma disciplina que aplica métodos matemáticos e estatísticos para otimizar processos e apoiar a tomada de decisões em sistemas complexos, como os logísticos. Segundo Sá, Arpini e Santos (2019), a PO permite a modelagem de problemas reais, facilitando a identificação de soluções eficientes para desafios como roteirização de veículos, alocação de recursos e gestão de estoques. Essas aplicações são fundamentais para melhorar o desempenho logístico e reduzir custos nas atividades logísticas.

No contexto do transporte rodoviário de cargas, Lima, Fernandes e Oliva (2018) demonstram como a PO pode ser utilizada para resolver problemas logísticos, como a definição de rotas ótimas e a programação de entregas. Através da aplicação de técnicas como programação linear e algoritmos de otimização, é possível aprimorar a distribuição de cargas, minimizar o tempo de transporte e melhorar a utilização dos veículos, resultando em operações mais eficazes e econômicas.

Além disso, a integração da PO com tecnologias emergentes, como a inteligência artificial (IA), tem ampliado seu potencial na logística. Conforme Birelo (2024), a IA pode transformar significativamente os processos logísticos, permitindo análises preditivas, automação de decisões e adaptação em tempo real às variáveis do mercado. Esse conjunto entre PO e IA contribui para a criação de sistemas logísticos mais inteligentes, ágeis e resilientes, alinhando-se às demandas da Logística 4.0.

2.3.1 Otimização de rotas no transporte de cargas

A otimização de rotas no transporte de carga é uma estratégia fundamental para melhorar a eficiência logística e reduzir despesas operacionais. Com o crescimento do comércio eletrônico e a crescente demanda por entregas rápidas, as empresas enfrentam desafios cada vez mais complexos na gestão de suas frotas e na definição de trajetos eficientes (Lopes; Veiga; Pereira, 2024).

Nesse cenário, tecnologias avançadas como inteligência artificial e algoritmos de aprendizado de máquina têm se destacado por permitir às organizações uma adaptação dinâmica às condições variáveis do trânsito e às exigências dos clientes, promovendo uma logística mais ágil e responsiva (Marton; Perez; Ferreira, 2024)

A Indústria 4.0 e o uso de tecnologias digitais reforçam esse movimento, especialmente por meio da inteligência artificial, do aprendizado de máquina e da análise preditiva. Essas soluções possibilitam não apenas o planejamento otimizado das rotas, mas também a adaptação em tempo real a eventos inesperados, como congestionamentos e mudanças climáticas, tornando o transporte mais eficiente e confiável (Morais; Moraes, 2024).

Estudos de caso, como o da ID Cargo Brasil Ltda, evidenciam de forma concreta os benefícios dessa abordagem. A empresa enfrentava dificuldades operacionais relacionadas ao retorno de contêineres vazios, o que gerava altos custos e comprometia a eficiência das operações. Com a implementação de uma plataforma digital de gestão logística, foi possível obter maior visibilidade dos processos e realizar uma alocação mais estratégica dos recursos, resultando em ganhos substanciais de produtividade e redução de despesas operacionais (Nascimento *et al.*, 2022).

A prática da otimização de rotas envolve a identificação de trajetos mais eficientes com o objetivo de reduzir o tempo de deslocamento, o consumo de combustível e os custos operacionais. Para isso, são aplicadas metodologias sistemáticas e técnicas computacionais capazes de resolver problemas complexos de roteirização, considerando fatores como capacidade veicular, janelas de tempo, restrições legais e características específicas das cargas transportadas (Sousa; Silva; Frazão, 2024).

Além dos ganhos operacionais, os princípios da otimização de rotas também estão alinhados à sustentabilidade. A busca por rotas mais eficientes contribui para a diminuição da emissão de poluentes, reforçando o compromisso ambiental das empresas. A logística moderna, nesse contexto, faz uso intensivo de ferramentas baseadas em algoritmos de roteirização para apoiar decisões estratégicas e operacionais (Simão; Scariot; Cezne, 2022).

Por fim, a base conceitual da otimização de rotas fundamenta-se na aplicação de modelos matemáticos que estruturam os problemas logísticos por meio de

variáveis, funções objetivo e restrições. Um dos modelos mais utilizados é o Problema de Roteamento de Veículos (VRP), cuja finalidade é determinar rotas eficientes para atender múltiplos clientes, minimizando custos como distância percorrida, tempo de viagem ou consumo de combustível. Essa abordagem possibilita uma análise sistemática dos desafios logísticos e a obtenção de soluções eficazes para contextos operacionais complexos (Guerrero; Villamarin; Padilla, 2020).

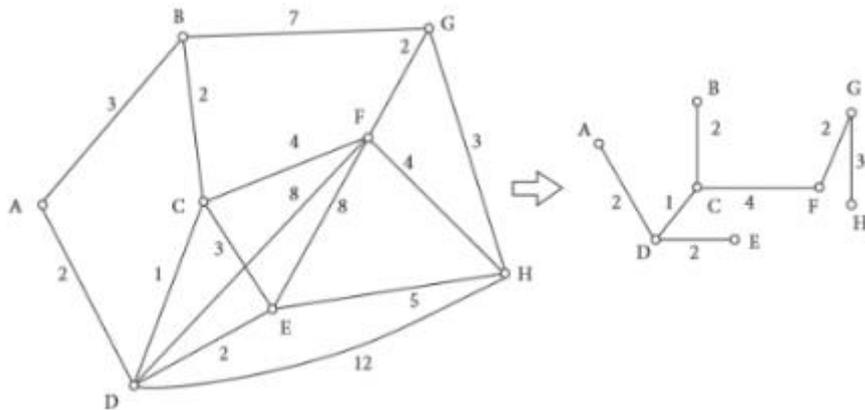
2.3.2 O problema do caminho mínimo

O problema do caminho mínimo é um dos modelos mais aplicados da Pesquisa Operacional, especialmente na análise de redes e na otimização de rotas. De acordo com Virgillito (2017), esse tipo de problema tem como objetivo determinar o trajeto de menor custo, distância ou tempo entre dois pontos de uma rede, considerando que cada ligação entre nós possui um valor associado, denominado peso ou custo. A estrutura de rede é representada por grafos, compostos por vértices (nós) e arestas (arcos), que modelam as possíveis conexões entre os pontos analisados (Guerrero; Villamarin; Padilla, 2020).

Segundo Longaray (2013), a aplicação desse modelo é fundamental em contextos logísticos e de transporte, pois possibilita a definição de rotas mais econômicas e eficientes, reduzindo custos operacionais e otimizando o uso de recursos. Em operações de transporte, por exemplo, o caminho mínimo permite identificar o percurso mais vantajoso entre a origem e o destino, levando em conta variáveis como distância percorrida, consumo de combustível e tempo de deslocamento.

Rodrigues (2017) destaca que a resolução do problema do caminho mínimo envolve a aplicação de algoritmos específicos, como o algoritmo de Dijkstra e o algoritmo de *Bellman-Ford*, que possibilitam identificar a rota de menor custo dentro de uma rede (Figura 1). A escolha do método depende das características do problema, como o número de nós e a presença ou não de valores negativos nos arcos. Esses algoritmos são amplamente utilizados em sistemas de transporte, redes de comunicação e planejamento de logística, devido à sua capacidade de gerar soluções rápidas e precisas.

Figura 1: Grafo para determinação do caminho mínimo



Fonte: Rodrigues, 2017, p. 78.

Assim, o modelo de caminho mínimo representa uma ferramenta essencial para o processo decisório em operações logísticas, contribuindo diretamente para a redução de custos, a melhoria da eficiência e a racionalização de recursos. Conforme salientam Virgillito (2017), Longaray (2013) e Rodrigues (2017), seu uso proporciona ganhos expressivos em produtividade e competitividade, tornando-se indispensável em ambientes que demandam planejamento otimizado de rotas e fluxos.

2.4 TECNOLOGIAS E INOVAÇÕES NO TRANSPORTE

O setor de transporte de cargas tem passado por uma transformação profunda, impulsionada por avanços tecnológicos que elevam o desempenho logístico, reduzem custos e promovem maior sustentabilidade. A incorporação de recursos tecnológicos, como Internet das Coisas (IoT), *Big Data*, inteligência artificial (IA) e automação, possibilita o monitoramento em tempo real e o controle mais preciso dos processos logísticos. Essas ferramentas permitem uma gestão dinâmica dos recursos, favorecendo modelos de negócios mais flexíveis e capazes de se adaptar rapidamente às demandas do mercado atual (Soares, 2022).

Entre os principais avanços, destacam-se os sistemas inteligentes de navegação e gestão de rotas, que utilizam algoritmos de IA para analisar dados como condições de trânsito, clima e volume de cargas, garantindo a definição de rotas mais seguras e eficientes. Essa integração tecnológica promove a redução das despesas operacionais, o aumento da produtividade e a melhoria na qualidade dos serviços,

impactando positivamente o desempenho competitivo das organizações no setor (Sousa; Silva; Frazão, 2024).

Além da otimização logística, as tecnologias aplicadas ao transporte desempenham um papel fundamental na sustentabilidade ambiental. O uso de modelos preditivos e algoritmos otimizadores permite o planejamento de rotas que minimizam o consumo de combustível e a emissão de gases poluentes, alinhando eficiência econômica à responsabilidade socioambiental (Albuquerque, 2024). Esse compromisso com a sustentabilidade tem se tornado um diferencial competitivo para as empresas que buscam consolidar sua posição no mercado (Soares, 2022).

Outra contribuição significativa da inteligência artificial é a gestão de riscos físicos durante o transporte rodoviário. A análise preditiva, aliada aos sistemas de navegação inteligente, auxilia na prevenção de acidentes e na mitigação de perdas, fortalecendo a segurança das operações. Essas tecnologias permitem um planejamento proativo e uma rápida tomada de decisão diante de imprevistos, reduzindo riscos e aumentando a confiabilidade dos serviços logísticos (Marton; Perez; Ferreira, 2024).

Por fim, a adoção crescente dessas inovações tecnológicas configura-se como um elemento imprescindível para a modernização do transporte de cargas. Além de proporcionar vantagens competitivas, elas garantem maior eficiência, resiliência e sustentabilidade às operações, possibilitando que as empresas enfrentem os desafios contemporâneos e se alinhem às tendências globais de logística inteligente e sustentável (Birelo, 2024).

2.4.1 Análise de Custo-Benefício na Implementação de Sistemas de Otimização de Rotas

A análise de custo-benefício (ACB) é uma ferramenta essencial na avaliação da viabilidade econômica de projetos logísticos, especialmente na implementação de sistemas de otimização de rotas. Essa abordagem permite comparar os custos associados à adoção de novas tecnologias e processos com os benefícios esperados, como redução de despesas operacionais, melhoria na eficiência e aumento da satisfação do cliente. Segundo Roscoe (2014), a ACB proporciona uma base sólida

para a tomada de decisões estratégicas, considerando não apenas os aspectos financeiros, mas também as externalidades sociais e ambientais envolvidas.

Em estudos aplicados ao setor de transporte, observa-se que a implementação de sistemas de otimização de rotas pode resultar em economias significativas. Dutra (2023) destaca que, em uma indústria alimentícia, a adoção de técnicas de roteirização eficientes levou a uma redução de aproximadamente 16,26% nos custos relacionados ao transporte, mesmo com um aumento de 33,12% no peso total das cargas transportadas.

Além disso, a utilização de modelos matemáticos, como a programação linear, tem se mostrado eficaz na otimização dos custos de transporte. Em um estudo de caso em uma transportadora de gás liquefeito de petróleo, a aplicação desse modelo resultou em uma economia mensal de R\$248.792,82, representando uma redução de aproximadamente 23% nos custos de transporte (De Azevedo *et al.*, 2018). Tais evidências reforçam a importância da ACB na identificação de soluções logísticas que proporcionem retorno financeiro e operacional.

2.4.2 Tendências no Transporte Logístico: Logística 4.0 e Oportunidades

O setor de transporte logístico vem passando por transformações profundas impulsionadas pela Logística 4.0, que integra tecnologias emergentes como *Internet das Coisas* (IoT), *Big Data*, Inteligência Artificial (IA) e automação. Essas ferramentas possibilitam uma gestão mais precisa, integrada e em tempo real das cadeias logísticas, potencializando o desempenho operacional e promovendo a redução de despesas (Silva; Kawakame, 2021). Segundo os autores, a Logística 4.0 oferece maior visibilidade dos processos, do planejamento à entrega final, garantindo agilidade e qualidade nos serviços.

Entretanto, a adoção dessas tecnologias enfrenta desafios consideráveis. Investimentos robustos em infraestrutura, a capacitação de pessoal e mudanças culturais nas organizações são barreiras frequentes. Além disso, questões relacionadas à segurança da informação, à interoperabilidade entre sistemas distintos e à resistência à mudança dificultam a plena implementação dessas inovações. Pereira (2019) ressalta que esses desafios demandam atenção conjunta da academia

e da indústria para que os recursos sejam melhor aproveitados e o desempenho operacional otimizado.

Apesar das dificuldades, as oportunidades geradas pelas inovações são significativas. A utilização de sistemas avançados possibilita melhorias substanciais na previsão de demanda, personalização dos serviços e sustentabilidade das operações, sobretudo por meio da otimização de rotas e da redução das emissões de carbono. Conforme destaca o relatório da *Rangel Logistics Solutions (2025)*, práticas sustentáveis e o uso de veículos elétricos estão se tornando cada vez mais viáveis economicamente, proporcionando ganhos ambientais e financeiros.

Assim, a capacidade das organizações de se adaptar e inovar será determinante para aproveitar essas oportunidades e superar os desafios no transporte logístico. A Logística 4.0 representa, portanto, uma transformação estrutural na gestão logística, baseada na incorporação de recursos tecnológicos como IoT, inteligência artificial, *big data* e sistemas ciberfísicos. Essa nova fase amplia a integração, automação e inteligência dos processos, promovendo maior eficiência, rastreabilidade e flexibilidade em ambientes empresariais altamente competitivos (Arruda, 2021).

Além dos ganhos operacionais, a Logística 4.0 contribui significativamente para a sustentabilidade, pois permite o uso racional dos recursos, a redução de desperdícios e minimizar os impactos ambientais. Rodrigues (2022) destaca que o emprego dessas tecnologias favorece práticas sustentáveis, como o gerenciamento otimizado de rotas, o controle das emissões de gases poluentes e a minimização do consumo de recursos nas operações. Esse alinhamento entre inovação tecnológica e responsabilidade ambiental é fundamental para que as empresas atendam às exigências regulatórias e às crescentes demandas sociais.

Outro aspecto marcante da Logística 4.0 é a personalização e a adaptação dinâmica dos sistemas logísticos. A análise de grandes volumes de dados permite prever necessidades específicas dos clientes e ajustar a rede de suprimentos de forma proativa, aumentando a competitividade e a satisfação do consumidor. A flexibilidade para modificar processos, estoques e transportes de maneira ágil torna as operações mais resilientes frente às mudanças do mercado globalizado, gerando vantagens estratégicas para as organizações (Silva; Kawakame, 2021).

Por fim, é importante destacar que a implementação da Logística 4.0 ainda enfrenta obstáculos relevantes, especialmente para pequenas e médias empresas, que se deparam com altos custos de investimento, falta de conhecimento técnico e resistência a mudanças culturais e organizacionais. Para superar essas barreiras, é imprescindível uma gestão estratégica bem estruturada aliada à capacitação contínua das equipes, o que, segundo Gomes (2021), é essencial para viabilizar a adoção eficaz das tecnologias emergentes.

3 METODOLOGIA

De acordo com Marconi e Lakatos (2023), a metodologia compreende o conjunto de procedimentos sistemáticos e organizados que orientam a realização de uma pesquisa científica, possibilitando alcançar os objetivos com maior precisão, clareza e fundamentação. Nesse sentido, a escolha dos métodos, técnicas e abordagens deve estar diretamente relacionada à natureza do problema e às perguntas de pesquisa, fornecendo a estrutura necessária para transformar dados empíricos em resultados relevantes.

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos utilizados no desenvolvimento deste estudo, cujo objetivo é analisar e propor alternativas para a redução de custos operacionais de um motorista autônomo por meio da otimização de rotas, com base no problema do caminho mínimo. A escolha dos métodos é justificada, visando garantir a validade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS

Os métodos e técnicas de pesquisa são elementos essenciais para a condução de estudos científicos, pois orientam a coleta, análise e interpretação dos dados. Segundo Gil (2019), os métodos referem-se ao caminho sistemático adotado pelo pesquisador, enquanto as técnicas consistem nos instrumentos operacionais utilizados para alcançar os objetivos propostos.

Complementando essa perspectiva, Lozada e Nunes (2019) destacam que as técnicas podem ser aplicadas de forma isolada ou combinada, desde que estejam alinhadas aos objetivos e às questões da pesquisa. Essa escolha não deve ser aleatória: ela deve levar em conta a natureza do problema investigado, assegurando coerência e rigor ao processo investigativo.

Dessa forma, a articulação entre diferentes técnicas pode ampliar a compreensão do fenômeno estudado, desde que haja clareza e consistência teórico-metodológica. Com base nesse princípio, as técnicas adotadas neste trabalho foram selecionadas conforme sua adequação ao objeto de estudo, com o intuito de garantir a validade dos resultados apresentados.

3.1.1 Métodos de abordagem

A presente pesquisa adota uma abordagem metodológica mista, combinando os métodos quantitativo e qualitativo com o propósito de proporcionar uma compreensão mais abrangente e aprofundada do fenômeno em análise. Conforme expõe Gil (2019), a abordagem quantitativa fundamenta-se na mensuração objetiva dos fenômenos, valendo-se de instrumentos estatísticos e matemáticos para a análise de dados numéricos e a testagem de hipóteses, o que confere maior rigor, precisão e possibilidade de generalização dos resultados.

Em contrapartida, a abordagem qualitativa, segundo Vergara (2020), visa interpretar e compreender a realidade a partir da análise de significados, opiniões e percepções dos sujeitos envolvidos, permitindo a exploração de dimensões subjetivas e contextuais do problema investigado.

Dessa forma, a integração entre ambas as abordagens se revelou adequada diante da complexidade do objeto de estudo; os custos operacionais enfrentados por um motorista autônomo e a proposição de rotas otimizadas. A abordagem quantitativa foi empregada na coleta, organização e análise de dados objetivos relacionados aos custos operacionais, como consumo de combustível, quilometragem percorrida, manutenção e pedágios.

Complementarmente, a perspectiva qualitativa permitiu captar as percepções, experiências e estratégias adotadas pelo motorista em sua rotina de trabalho, com foco em suas decisões logísticas e nos desafios enfrentados no exercício da atividade. Assim, a adoção de uma abordagem metodológica mista possibilitou não apenas a quantificação dos fatores envolvidos, mas também a compreensão das relações causais e dos aspectos contextuais que permeavam o transporte rodoviário de cargas sob a perspectiva do trabalhador autônomo.

3.1.2 Objetivos da pesquisa

Este estudo, quanto aos seus objetivos, caracteriza-se como pesquisa exploratória e descritiva. De acordo com Leão (2019), a pesquisa exploratória possibilita um maior volume de informações e amplia a compreensão do tema abordado, favorecendo a formulação de novos problemas e hipóteses. A pesquisa descritiva, por sua vez, foi utilizada com o propósito de caracterizar e quantificar

elementos concretos da atividade profissional, como consumo de combustível, gastos com manutenção, pedágios e distâncias percorridas (Gil, 2017). A descrição precisa desses dados permitiu ilustrar o problema em análise, favorecendo uma leitura mais clara do contexto operacional, estudando e aprofundando o entendimento da dinâmica logística enfrentada pelo trabalhador.

No presente estudo, foram empregadas estratégias exploratórias como entrevistas não estruturadas, revisão bibliográfica preliminar e observações diretas, que contribuíram para a identificação e o entendimento das variáveis envolvidas no cotidiano do motorista autônomo. A dimensão exploratória mostrou-se essencial para identificar padrões de comportamento, percepções individuais e desafios enfrentados no exercício da atividade, enquanto a abordagem descritiva permitiu estruturar e organizar as informações obtidas, fornecendo uma base consistente para análises posteriores.

Em consonância com o objetivo deste estudo, realizou-se uma pesquisa exploratória e descritiva acerca da rotina de trabalho do motorista, com foco nos custos operacionais e na proposição de rotas otimizadas. A escolha por essa abordagem teve como propósito aprofundar a compreensão do fenômeno investigado e descrever com precisão os elementos que compõem a realidade do profissional, possibilitando uma análise detalhada das práticas atuais e das oportunidades de melhoria.

3.1.3 Métodos de procedimentos técnicos

De acordo com Marconi e Lakatos (2021), os procedimentos técnicos correspondem aos meios utilizados para alcançar o conhecimento científico, por meio da seleção de instrumentos apropriados para coleta e análise de dados. Neste estudo, foram adotados os seguintes procedimentos técnicos: estudo de caso e pesquisa comparativa.

O estudo de caso caracteriza-se pela investigação profunda de um fenômeno em seu contexto real, permitindo a compreensão de suas particularidades. Conforme Gil (2019), essa estratégia viabiliza a análise minuciosa de um único caso, sendo especialmente útil para explorar aspectos específicos de determinada realidade. Assim, neste trabalho, foi analisado o caso de um motorista autônomo que atua em

rotas interestaduais, buscando compreender sua dinâmica operacional e propor melhorias.

Além disso, trata-se também de uma pesquisa comparativa, uma vez que os dados da situação atual - como os custos operacionais e as rotas praticadas - foram comparados com os resultados gerados a partir da proposta de otimização. Essa abordagem possibilitou avaliar o impacto das melhorias sugeridas, contribuindo para a análise da eficácia das soluções propostas no contexto real investigado (Prodanov; Freitas 2021).

3.1.4 Técnicas de coletas de dados

Para a coleta de dados, foram utilizadas diferentes técnicas, como a pesquisa bibliográfica, pesquisa documental e entrevista informal. A pesquisa bibliográfica consiste no levantamento, seleção e análise de obras publicadas, como livros, artigos científicos, dissertações e teses, com o intuito de fundamentar teoricamente o estudo. Conforme Gil (2019), essa modalidade permite conhecer o estado atual do conhecimento sobre o tema, identificar lacunas e embasar conceitualmente a investigação.

Complementando essa técnica, a pesquisa documental refere-se à análise de documentos originais, escritos ou não, que ainda não receberam tratamento analítico aprofundado. Segundo Prodanov e Freitas (2021), essa técnica possibilita a extração de informações relevantes a partir de fontes como planilhas, relatórios, comprovantes e registros de natureza institucional ou pessoal. No presente estudo, foram utilizados documentos fornecidos pelo motorista, tais como relatórios de despesas, notas fiscais e registros de manutenção.

Por fim, a entrevista informal foi empregada como uma técnica qualitativa e flexível. Sua finalidade principal foi obter dados subjetivos e aprofundados diretamente do motorista, permitindo a compreensão da rotina operacional, dos critérios de escolha de rotas e da percepção do ator sobre os custos e a eficiência. Essa abordagem não estruturada foi crucial para contextualizar os dados numéricos, detalhar a escolha atual das rotas e capturar informações de despesas não formalmente registradas, assegurando que o modelo de otimização proposto estivesse alinhado com a realidade e as necessidades práticas do motorista.

3.1.5 Técnicas de análise de dados

Para a análise dos dados coletados neste estudo, adotou-se a análise de conteúdo como metodologia central, por permitir a interpretação sistemática de informações qualitativas e quantitativas, contribuindo para a compreensão aprofundada dos fenômenos observados. No âmbito das informações descritivas, a análise de conteúdo possibilitou a categorização dos registros, a identificação de padrões e a extração de significados relevantes sobre as práticas, percepções e estratégias de gestão do motorista autônomo, bem como sobre os principais desafios enfrentados no exercício da atividade.

De forma complementar, os dados quantitativos provenientes da modelagem computacional também foram examinados por meio dessa abordagem, considerando sua importância para o entendimento global do problema investigado. A modelagem foi desenvolvida no *software Excel*, e a resolução do modelo ocorreu com o uso do suplemento *Solver*, empregado para solucionar o problema do caminho mínimo e identificar as rotas otimizadas. Os parâmetros considerados incluíram quilometragem, tempo estimado de deslocamento, valores de pedágios, custo por litro de combustível, além de outros custos operacionais envolvidos no processo.

Os resultados dessa simulação permitiram comparar os trajetos atualmente realizados com as rotas otimizadas propostas, evidenciando oportunidades de redução de custos e aumento da eficiência operacional. Assim, a aplicação da análise de conteúdo, tanto às informações qualitativas quanto aos dados numéricos, mostrou-se uma estratégia eficaz para integrar diferentes dimensões da realidade estudada e fundamentar as propostas de melhoria apresentadas neste trabalho.

3.1.6 Local da pesquisa

A pesquisa foi conduzida com um motorista autônomo residente no estado do Rio Grande do Sul, que atua profissionalmente em rotas interestaduais e regionais. Essa escolha do local é estratégica, considerando a relevância logística do Rio Grande do Sul como polo de transporte rodoviário no Sul do Brasil, o que possibilita o acompanhamento de trajetos variados, tanto dentro do estado quanto para outras regiões do país. O motorista em questão utiliza um caminhão da marca Volvo, modelo

FH, ano 2006, que é o veículo empregado nas operações diárias e que serviu como base para a análise dos custos e rotas estudadas.

Para garantir uma análise abrangente, o período de coleta de dados ocorreu entre os meses de julho de 2024 a junho de 2025, totalizando doze meses de acompanhamento contínuo. Essa janela temporal foi definida com o intuito de captar uma amostra representativa, contemplando diferentes condições operacionais, como sazonalidades no fluxo de transporte e oscilações nos custos relacionados ao combustível, rotas percorridas, manutenção e pedágios. Assim, foi possível analisar de forma mais detalhada e precisa os fatores que influenciaram os custos operacionais ao longo do semestre, proporcionando resultados consistentes para a pesquisa.

3.1.7 Sujeito da pesquisa

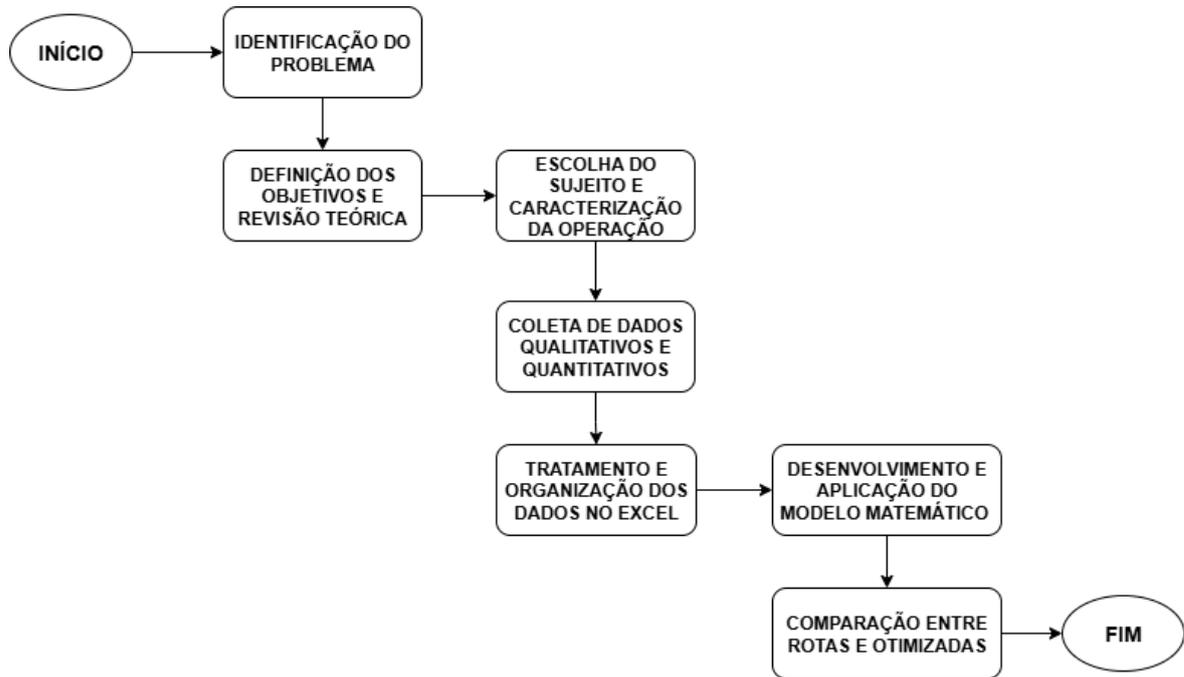
O sujeito desta pesquisa foi um motorista de caminhão autônomo, com atuação consolidada no transporte rodoviário de cargas. A escolha do participante foi realizada por conveniência, considerando critérios como experiência na atividade, disponibilidade para colaborar com o estudo durante o período proposto, acesso e organização de registros operacionais (como dados de rotas, consumo de combustível, pedágios, manutenção e receitas) e interesse em contribuir com o desenvolvimento da pesquisa.

A participação ocorreu de forma voluntária, mediante aceite formal e esclarecimento quanto aos objetivos e procedimentos do estudo. Ressaltou-se que todas as informações coletadas foram tratadas de forma confidencial, sendo utilizadas exclusivamente para fins acadêmicos, em conformidade com os princípios éticos da pesquisa científica e com a preservação da identidade do participante.

3.1.8 Etapas das atividades

Para esclarecer a metodologia aplicada neste estudo, a Figura 2 ilustra, por meio de um fluxograma, as principais etapas do processo. Em seguida, são apresentadas as descrições detalhadas de cada uma dessas etapas.

Figura 2: Fluxograma do trabalho de pesquisa



Fonte: Autora (2025).

A metodologia desta pesquisa foi estruturada em etapas sequenciais e interdependentes, com o objetivo de garantir a sistematização do estudo e a confiabilidade dos resultados obtidos. Inicialmente, procedeu-se à identificação do problema de pesquisa, momento em que foram analisadas as limitações logísticas da operação em estudo, permitindo delimitar o foco investigativo.

Na sequência, realizou-se a definição dos objetivos e a revisão teórica, com a finalidade de fundamentar conceitualmente o estudo e orientar a escolha dos métodos e técnicas aplicadas. Esse processo incluiu a análise de autores relevantes na área de logística, transporte e otimização de rotas. Posteriormente, foi feita a escolha do sujeito da pesquisa, identificando a empresa e operação logística a serem analisadas. Nessa etapa, caracterizou-se o cenário operacional, descrevendo variáveis como tipo de carga, frequência de entregas, regiões atendidas e recursos disponíveis.

A etapa seguinte consistiu na coleta de dados qualitativos e quantitativos, abrangendo registros operacionais, entrevistas com responsáveis logísticos e observações diretas. Os dados coletados foram, então, organizados e tratados em planilhas eletrônicas (*Excel*), viabilizando sua estruturação para análises posteriores.

Com base nesses dados, foi realizado o desenvolvimento e a aplicação de um modelo matemático, baseado no problema do caminho mínimo, com o intuito de descobrir a rota ótima. A seguir, promoveu-se a comparação entre as rotas reais e as rotas otimizadas geradas pelo modelo, considerando indicadores como tempo, quilometragem, distância e custo.

Os resultados dessa comparação foram analisados criticamente na etapa de análise dos resultados, permitindo identificar os principais ganhos operacionais e possíveis limitações do modelo proposto. Por fim, o estudo foi encerrado com a formulação das conclusões e recomendações práticas, voltadas à melhoria do processo logístico do motorista estudado e à contribuição teórica da pesquisa.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresenta-se a análise e interpretação dos dados obtidos ao longo da realização deste estudo. A partir das informações coletadas, buscou-se compreender o processo de escolha das rotas, reconhecer os fatores que mais influenciam os custos operacionais, bem como identificar os mesmos, a fim de propor alternativas capazes de apoiar a tomada de decisão.

Nesse sentido, foram realizados o mapeamento do processo de transporte, a identificação dos custos, o desenvolvimento e aplicação de modelos matemáticos de otimização de rotas baseado em um problema de caminho mínimo, bem como a validação dos resultados por meio da comparação entre os custos atuais e os obtidos nas rotas otimizadas. Por fim, avaliou-se o impacto financeiro dessas mudanças e apresentou-se sugestões que visam aprimorar a eficiência operacional e reduzir os custos operacionais, contribuindo para uma gestão mais sustentável e estratégica da atividade.

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo deste trabalho é um motorista profissional com mais de 20 anos de experiência no transporte rodoviário de cargas, cuja trajetória evidencia um profundo conhecimento sobre a dinâmica logística e a condução segura de veículos de grande porte. Ao longo de sua carreira, o profissional atuou no transporte de diversos tipos de produtos, como bebidas e materiais de construção, adquirindo ampla experiência no manejo de cargas variadas e no enfrentamento dos desafios impostos pelas estradas, pelas condições de tráfego e pelas diferentes exigências operacionais.

Nos últimos dois anos, o motorista passou a operar com caminhão próprio, um Volvo FH 380, ano 2006, especializado no transporte de grãos e fertilizantes. Com capacidade para 38 toneladas, o veículo é utilizado tanto em trajetos dentro do estado do Rio Grande do Sul quanto em rotas interestaduais, conectando o estado ao Mato Grosso do Sul. Essa transição para o transporte de cargas agrícolas representou um novo desafio profissional, exigindo competências específicas relacionadas ao planejamento estratégico de rotas de longo percurso, à gestão operacional do caminhão de propriedade própria e à preservação da integridade das cargas transportadas.

A rotina de viagens do motorista é intensa, com uma média de 15 deslocamentos por mês, tendo como principais destinos os trechos Crissiumal à Rio Grande e Rio Grande à Mato Grosso do Sul, percorrendo uma quilometragem significativa a cada ciclo de trabalho. Do ponto de vista financeiro, sua remuneração está atrelada à tonelada transportada, o que demanda um planejamento cuidadoso para equilibrar custos e garantir rentabilidade.

No que diz respeito às condições do veículo, destaca-se que o caminhão, embora fabricado em 2006, mantém-se em operação eficiente devido à realização de manutenções preventivas mensais, prática essencial para assegurar a confiabilidade e reduzir o risco de falhas durante as viagens. O consumo médio de combustível é de cerca de 1,8 km/L, indicador de grande impacto na análise dos custos operacionais, uma vez que o combustível representa uma das principais despesas do transporte rodoviário de cargas.

Por fim, o cotidiano do motorista vai muito além da condução do veículo, ele envolve o gerenciamento de uma série de atividades correlatas, como a manutenção preventiva do caminhão, o monitoramento do consumo de combustível, o controle de pedágios e o planejamento de paradas estratégicas ao longo da rota. Além disso, o profissional precisa lidar constantemente com imprevistos, como condições climáticas adversas, tráfego intenso ou alterações de última hora nas demandas logísticas, desenvolvendo habilidades de adaptabilidade e tomada de decisão rápida, fundamentais para garantir a segurança, a eficiência e a pontualidade das operações.

4.1.1 Caracterização do problema

No transporte autônomo de cargas, tomar decisões é um processo complexo, que envolve aspectos operacionais, econômicos e logísticos, e que impacta diretamente a eficiência, a segurança e a rentabilidade das operações. O motorista, ao longo de sua trajetória desenvolveu habilidades importantes para planejar rotas, programar carregamentos, gerenciar o consumo de combustível, realizar a manutenção do veículo e cumprir prazos. Grande parte dessas decisões são baseadas na experiência adquirida ao longo de anos de prática, que se mostra um recurso valioso, mas que por si só nem sempre é suficiente para garantir a máxima eficiência das operações.

Apesar de toda a experiência, a falta de registros organizados e de análises objetivas limita a capacidade de avaliar alternativas, identificar oportunidades de melhoria e antecipar problemas. Por exemplo, na escolha da rota mais eficiente, muitas vezes o motorista depende de estimativas baseadas na prática, sem considerar de maneira estruturada variáveis como consumo de combustível, tempo de percurso e custos com pedágios. De forma semelhante, decisões relacionadas à manutenção preventiva do caminhão são tomadas com base em observações e percepções subjetivas, aumentando a chance de falhas mecânicas e custos inesperados.

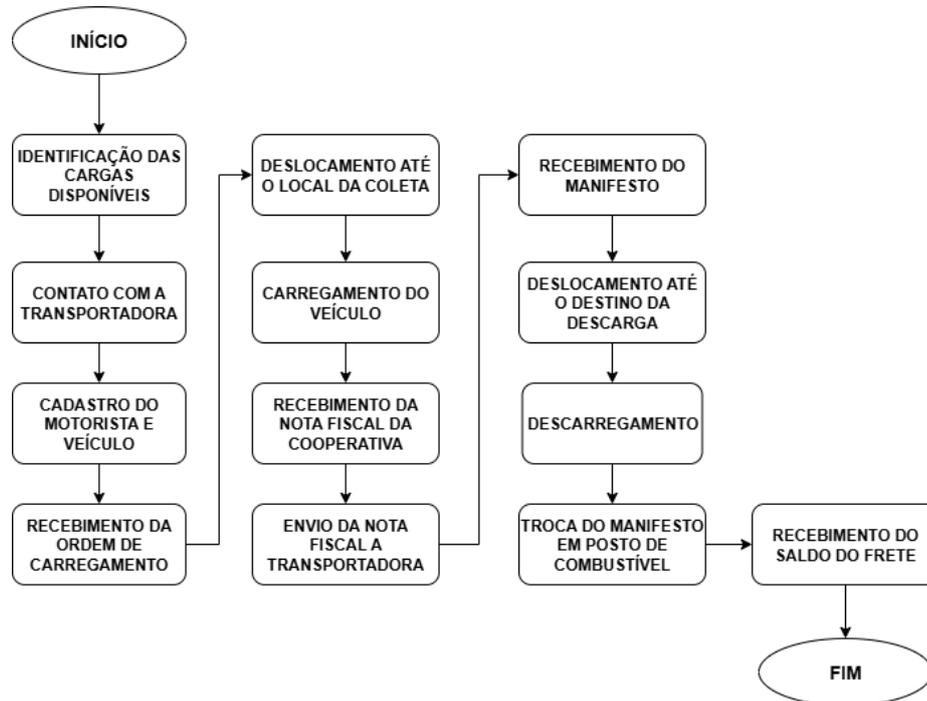
O transporte de grãos e fertilizantes adiciona desafios específicos, como a necessidade de preservar a integridade da carga, cumprir horários de entrega rígidos e lidar com condições climáticas adversas. Um exemplo prático é o descarregamento no Porto de Rio Grande, onde os agendamentos ocorrem em um intervalo fixo, das 6h às 12h. Caso o caminhão chegue fora desse horário, o descarregamento só poderá ser realizado no dia seguinte, no mesmo período agendado. Situações como essa mostram como atrasos ou falhas no planejamento podem afetar a logística e a produtividade, reforçando a importância de decisões fundamentadas em informações precisas.

Diante desse cenário, torna-se essencial organizar e sistematizar os dados das operações diárias do motorista, na qual a análise de informações sobre consumo de combustível, tempos de percurso, manutenção do veículo e custos operacionais oferece uma base sólida para a tomada de decisões estratégicas. Com esses dados, o proprietário do caminhão pode planejar rotas de maneira mais eficiente, antecipar necessidades de manutenção, controlar os custos operacionais e avaliar de forma objetiva o desempenho econômico das viagens, integrando experiência prática e planejamento fundamentado.

4.1.2 Mapeamento dos processos

O motorista é responsável por conduzir todo o processo de carregamento e descarregamento das cargas, desempenhando atividades que abrangem desde a identificação de fretes até a entrega final. O fluxo detalhado desse processo está representado na Figura 3.

Figura 3: Fluxograma do processo de carregamento e descarregamento



Fonte: Autora (2025).

Conforme ilustrado na Figura 3, o processo de transporte de cargas inicia-se com a identificação das cargas disponíveis. Essa busca é realizada por meio de aplicativos especializados, como *Log Strada*, *FreteBras*, *Tmove*, *Trize* e *Coamo*, bem como em grupos de *WhatsApp* voltados ao transporte de cargas. Nessa etapa, o motorista avalia as oportunidades de frete, considerando fatores como valor, distância, tipo de carga e prazos de entrega, para selecionar aquelas que se adequam à capacidade do veículo.

Após identificar uma carga adequada, o motorista entra em contato com a transportadora responsável pelo frete e nesse momento, ocorre o cadastro do motorista e do veículo, que inclui o fornecimento de informações pessoais, dados detalhados do caminhão e fotografias para validação. Esse procedimento garante que todos os envolvidos estejam devidamente registrados e aptos a realizar o transporte de forma segura e conforme a legislação vigente. Com o cadastro aprovado, o motorista recebe a ordem de carregamento, documento oficial que autoriza o deslocamento até o local de coleta da carga.

No local de carregamento, o motorista realiza o procedimento de embarque, garantindo que a carga seja acondicionada corretamente no veículo. Ao final do carregamento, a cooperativa fornece a nota fiscal, documento essencial que deve ser encaminhado à transportadora para formalização do processo e registro do frete. Posteriormente, a transportadora elabora o manifesto de carga, documento que formaliza a operação e é necessário para o recebimento do frete. O motorista retira esse manifesto no balcão de atendimento da cooperativa, antes de iniciar a viagem de descarga.

Ao chegar ao local de descarga, ele realiza o procedimento de descarregamento, certificando-se de que a carga seja entregue de forma completa e em perfeito estado. Após a entrega, o manifesto assinado é trocado em postos credenciados, permitindo a liberação do pagamento e garantindo o recebimento do saldo do frete, finalizando assim o ciclo completo do processo de transporte.

4.2 IDENTIFICAÇÃO DOS CUSTOS OPERACIONAIS

A identificação dos custos operacionais é essencial para compreender a estrutura econômica das atividades de transporte e avaliar sua rentabilidade. Esse levantamento possibilita analisar os principais gastos envolvidos na operação e direcionar ações voltadas à eficiência e ao controle financeiro. Na presente seção, os custos foram classificados em três categorias: variáveis, fixos e indiretos, permitindo uma análise detalhada dos fatores que impactam o desempenho econômico do motorista.

4.2.1 Custos variáveis

Para a análise aprofundada da estrutura de gastos do motorista, a Tabela 1 detalha os custos variáveis mensais observados nos últimos 12 meses. Tais custos: combustível, pedágio e manutenção representam os desembolsos diretamente relacionados à operação e volume de serviço.

Tabela 1: Custos variáveis da operação

MÊS/ANO	COMBUSTÍVEL	PEDÁGIO	MANUTENÇÃO
Julho/2024	R\$ 31.430,00	R\$ 1.770,00	R\$ 4.035,00
Agosto/2024	R\$ 20.240,00	R\$ 860,00	R\$ 1.760,00
Setembro/2024	R\$ 22.870,00	R\$ 910,00	R\$ 2.420,00
Outubro/2024	R\$ 25.410,00	R\$ 1.480,00	R\$ 1.980,00
Novembro/2024	R\$ 19.760,00	R\$ 720,00	R\$ 1.615,00
Dezembro/2024	R\$ 27.890,00	R\$ 1.310,00	R\$ 2.890,00
Janeiro/2025	R\$32.316,23	R\$ 512,68	R\$ 1.740,00
Fevereiro/2025	R\$20.022,40	\$1.456,40	R\$ 1.955,00
Março/2025	R\$24.847,80	\$754,00	R\$ 2.310,00
Abril/2025	R\$17.415,74	\$626,20	R\$ 1.605,00
Mai/2025	R\$27.804,98	\$2.433,90	R\$ 2.404,00
Junho/2025	R\$12.233,14	\$823,40	R\$ 2.500,00
TOTAL	\$273.070,96	\$13.956,58	\$23.214,00

Fonte: Autora (2025).

Conforme apresentado na Tabela 1, verifica-se que o combustível permaneceu como o componente de maior impacto financeiro, totalizando R\$273.070,96 no período de julho de 2024 a junho de 2025. O maior valor registrado ocorreu em janeiro de 2025, com R\$32.316,23, indicando maior quilometragem percorrida ou aumento no preço do combustível. Em contrapartida, o menor dispêndio foi observado em junho de 2025, com R\$12.233,14, o que está associado ao menor volume de deslocamentos ou rotas mais eficientes.

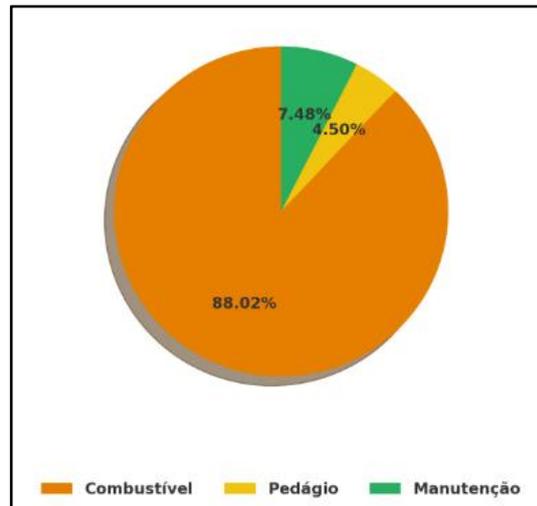
Os gastos com pedágio somaram R\$13.956,58 ao longo do período analisado, configurando a menor participação entre os custos variáveis. Destaca-se um aumento significativo em maio de 2025, quando as despesas atingiram R\$2.433,90, sugerindo a utilização de rodovias com maior número de praças tarifadas ou deslocamentos mais longos neste mês.

No que se refere à manutenção, observou-se um comportamento oscilante ao longo dos doze meses, totalizando R\$23.214,00. Os maiores valores foram registrados em dezembro de 2024 (R\$2.890,00) e junho de 2025 (R\$2.500,00), relacionados à necessidade de intervenções preventivas e corretivas. Em contraste, o mês de abril de 2025 apresentou o menor valor (R\$1.605,00), indicando redução na

demanda por reparos nesse período.

Para complementar a análise, a Figura 4 apresenta a distribuição percentual de cada categoria de custo variável, permitindo visualizar de forma imediata o peso relativo de combustível, pedágios e manutenção na composição total dos custos operacionais ao longo do período.

Figura 4: Percentual relativo de cada categoria



Fonte: Autora (2025).

Conforme apresentado na Figura 4, a análise percentual evidencia a expressiva predominância do combustível, que representa 88,02% do custo total. Esse resultado reforça que qualquer variação no preço do diesel ou na eficiência do consumo exerce impacto direto e significativo sobre o desempenho financeiro do motorista, configurando-se como o principal fator de sensibilidade dentro da estrutura de custos variáveis.

A manutenção aparece em segundo lugar, correspondendo a 7,48% do total. Embora apresente oscilações ao longo do período analisado, esse componente tende a manter um comportamento relativamente estável e mais previsível, tornando-se um custo administrável quando comparado ao peso financeiro do combustível. Ainda assim, sua participação não deve ser negligenciada, pois reflete o desgaste natural do veículo e a necessidade de intervenções regulares para garantir segurança e continuidade operacional.

Por fim, os pedágios representam 4,50% dos custos, indicando baixa relevância no montante total. Mesmo com eventuais variações mensais, esse item não

configura um elemento de grande impacto financeiro, mantendo-se como um fator de menor representatividade estratégica dentro da composição dos custos variáveis do motorista.

Além da análise da distribuição percentual dos custos, destaca-se a importância de observar a variação do preço do combustível ao longo do período avaliado, dado que esse elemento exerce influência direta sobre o resultado financeiro do motorista autônomo. A Figura 5 apresenta a evolução mensal do preço médio do óleo diesel no estado do Rio Grande do Sul entre julho de 2024 e junho de 2025, permitindo visualizar as oscilações e tendências que marcaram o período.

Figura 5: Variação mensal do preço do óleo diesel no Rio Grande do Sul (jul/2024 – jun/2025)



Fonte: Autora (2025).

Conforme apresentado na Figura 5, a análise dos dados obtidos por meio das notas de abastecimento evidencia uma oscilação moderada ao longo do período, com elevação gradual até março de 2025, quando o valor atinge o pico de R\$6,90. Nos meses seguintes, observa-se uma leve redução. Essa instabilidade reflete as variações típicas do mercado de combustíveis e demonstra o impacto direto do preço do diesel sobre os custos variáveis do transporte rodoviário.

4.2.2 Custos fixos

Além dos custos variáveis, a operação do motorista autônomo envolve despesas que se mantêm constantes ao longo do tempo, independentemente do volume de viagens realizadas. Nesta etapa, foram levantados os principais custos fixos relacionados à posse e manutenção do caminhão, com o objetivo de

compreender sua influência sobre o resultado financeiro mensal. No caso analisado foram identificados como custos fixos principais o financiamento do caminhão, a depreciação do veículo e as despesas administrativas. A seguir, apresenta-se a Tabela 2 com os valores mensais.

Tabela 2: Custos fixos da operação

DESPESA	VALOR MENSAL (R\$)
Financiamento	1.959,00
Depreciação	900,00
Despesas administrativas	200,00
TOTAL	3.059,00

Fonte: Autora (2025).

Conforme demonstrado na Tabela 2, o financiamento do caminhão apresenta um valor médio mensal de R\$1.959,00, correspondendo a aproximadamente 64% do total dos custos fixos, o que o torna o principal comprometimento financeiro dessa categoria. Trata-se de uma despesa constante, independentemente do número de viagens realizadas, caracterizando-se como um custo fixo obrigatório até a quitação do veículo.

A depreciação do caminhão foi calculada com base no valor de aquisição de R\$240.000,00 (ano de 2006), vida útil estimada em 20 anos e valor residual correspondente a 10% do valor de compra. A Tabela 3 apresenta o cálculo da depreciação mensal que resulta nos R\$900,00 utilizados no custo operacional.

Tabela 3: Cálculo da depreciação

DESCRIÇÃO	VALOR (R\$)
Valor de aquisição	240.000,00
Valor residual	24.000,00
Valor depreciável	216.000,00
Vida útil (meses)	240
Depreciação mensal	900,00

Fonte: Autora (2025).

Embora não gere desembolso financeiro imediato, a depreciação deve ser considerada no cálculo do custo total, uma vez que impacta diretamente a capacidade de reposição do ativo no futuro. Complementarmente, as despesas administrativas, que englobam serviços contábeis, telefonia e aplicativos de transporte, foram estimadas em R\$200,00 mensais, representando os recursos necessários para garantir o controle financeiro e operacional da atividade.

4.2.3 Custos indiretos

Os custos indiretos associados à operação do motorista autônomo foram levantados ao longo de doze meses, distribuídos em três categorias principais: alimentação, tempo de viagem ocioso e imprevistos. Os mesmos podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4: Custos indiretos da operação

DESPESA	VALOR MENSAL (R\$)
Alimentação	900,00
Tempo ocioso	750,00
Imprevistos	400,00
TOTAL	2.050,00

Fonte: Autora (2025).

Conforme a Tabela 4, o gasto com alimentação apresentou uma média mensal de R\$ 900,00 com variações entre R\$850,00 e R\$ 1.150,00 ao longo do período analisado. Tais oscilações refletem pequenas alterações na frequência e duração das viagens, demonstrando, contudo, uma tendência de estabilidade, o que indica que a alimentação se configura como um custo relativamente constante na operação.

O custo relacionado ao tempo de viagem ocioso, correspondente às horas em que o motorista permanece disponível sem realizar transporte ou trabalho produtivo, apresentou média mensal de R\$ 750,00, variando entre R\$ 200,00 e R\$ 900,00. Observa-se que períodos com menor volume de viagens resultaram em maior tempo ocioso, elevando os custos indiretos, enquanto meses de maior demanda reduziram essa média. Essa dinâmica evidencia a importância da gestão eficiente do tempo para a otimização da operação e minimização de custos.

Por sua vez, os imprevistos que englobam despesas não planejadas, como reparos emergenciais, ajustes no veículo ou outras ocorrências excepcionais, apresentaram média mensal de R\$ 400,00, com variação entre R\$ 200,00 e R\$ 650,00. A análise indica que determinados meses foram impactados por situações que elevaram temporariamente os custos e destacando a relevância do planejamento e do monitoramento contínuo para mitigar efeitos financeiros inesperados.

O custo total médio mensal das categorias analisadas atingiu R\$ 2.050,00. A distribuição desses valores evidencia que, embora a alimentação se mantenha relativamente estável, o tempo de viagem ocioso e os imprevistos apresentam flutuações significativas, capazes de influenciar de maneira relevante o resultado financeiro da operação do motorista.

4.3 LEVANTAMENTO DAS ROTAS ATUAIS E SEUS CUSTOS ASSOCIADOS

A presente seção tem como objetivo detalhar as rotas atualmente percorridas pelo motorista e analisar os custos operacionais associados a cada trajeto. Para tanto, foram apresentados os percursos mapeados, contemplando origem, destino e pontos intermediários, bem como os tempos médios de viagem e as distâncias percorridas.

4.3.1 Descrição das rotas atuais

Ao longo de doze meses, todas as viagens realizadas pelo motorista foram registradas permitindo o levantamento detalhado de dados relacionados à frequência, extensão, tempo de deslocamento e características específicas de cada trajeto. Durante esse período, em entrevista com o motorista, foram identificadas cinco rotas que ele considera estratégicas para a operação, por apresentarem maior relevância operacional e impacto financeiro, seja pela extensão, pela frequência das viagens ou pela complexidade logística envolvida. As rotas identificadas pelo motorista estão na Tabela 5.

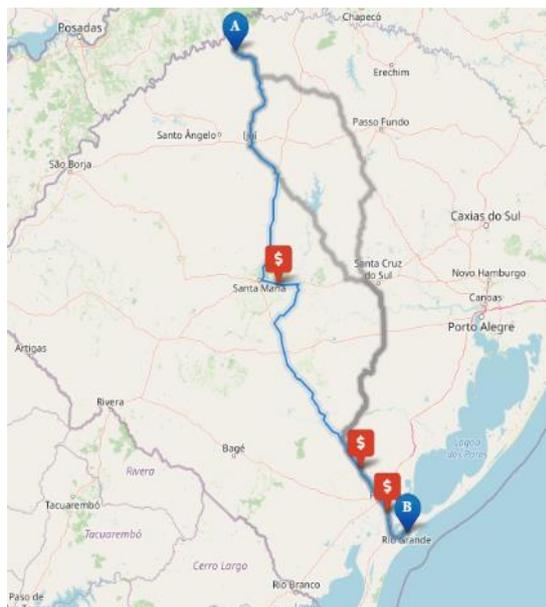
Tabela 5: Rotas mapeadas

ROTA	ORIGEM	DESTINO
Rota 1	Crissiumal - Rio Grande do Sul	Rio Grande - Rio Grande do Sul
Rota 2	Cruz Alta - Rio Grande do Sul	São Gabriel do Oeste - Mato Grosso do Sul
Rota 3	Rio Grande - Rio Grande do Sul	Sete Quedas - Mato Grosso do Sul
Rota 4	Antônio João -Mato Grosso do Sul	Nova Candelária - Rio Grande do Sul
Rota 5	Crissiumal - Rio Grande do Sul	Cruz Alta - Rio Grande do Sul

Fonte: Autora (2025).

Conforme pode ser observado na Tabela 5, a Rota 1 inicia-se no município de Crissiumal, localizado na região Noroeste do Rio Grande do Sul, e segue até Rio Grande, no extremo Sul do estado. O percurso totaliza aproximadamente 657 quilômetros, abrangendo trechos das rodovias RS-210, BR-472, BR-158 e BR-392. Apesar da boa fluidez no trânsito, há aumento de consumo nos trechos urbanos e nas áreas próximas ao porto, onde o fluxo de veículos pesados é intenso. A imagem da rota pode ser visualizada na Figura 6.

Figura 6: Rota entre Crissiumal (RS) x Rio Grande (RS)



Fonte: Adaptado de Google Maps (2025).

Já a rota 2 estabelece a ligação entre os municípios de Cruz Alta (RS) e São

Gabriel do Oeste (MS), abrangendo diversas cidades intermediárias ao longo do percurso. O trajeto desenvolve-se predominantemente no sentido sul-norte, atravessando os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, até alcançar o Mato Grosso do Sul. Conforme os dados obtidos, a extensão total da rota é de aproximadamente 1.293 quilômetros, caracterizando-se como um itinerário rodoviário de longa distância. A imagem da rota pode ser visualizada na Figura 7.

Figura 7: Rota entre Cruz Alta (RS) x São Gabriel do Oeste (MS)



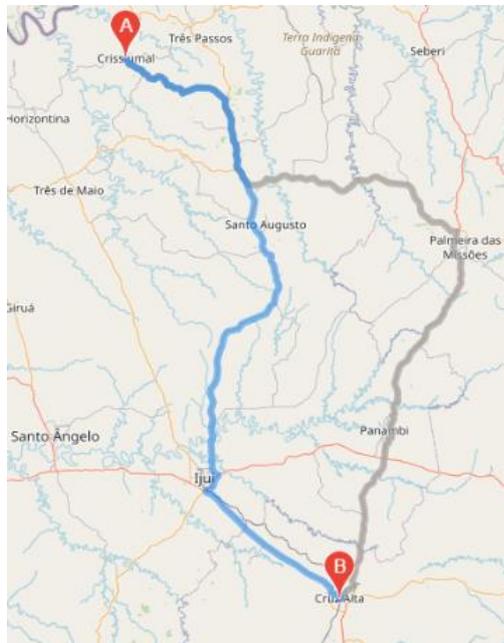
Fonte: Adaptado de *Google Maps* (2025).

Já a rota 3, compreende o trajeto entre Rio Grande (RS) e Sete Quedas (MS), com extensão aproximada de 1.323 quilômetros, caracterizando-se como um percurso de longa distância que interliga o extremo Sul ao Centro-Oeste do país. Trata-se de uma rota estratégica para o escoamento e redistribuição de cargas agrícolas e insumos industriais, conectando o Porto de Rio Grande, importante polo exportador gaúcho, às regiões produtoras do Mato Grosso do Sul. A imagem da rota pode ser visualizada na Figura 8.

De acordo com a Figura 9, ao longo do trajeto, o motorista passa por pontos intermediários em municípios como Dourados (MS), Cascavel (PR) e Foz do Iguaçu (PR). Essas localidades funcionam como referência para paradas técnicas, abastecimento e descanso, devido à infraestrutura adequada de apoio ao transporte rodoviário. O principal desafio está nos trechos urbanos e no tráfego denso entre o Paraná e o Rio Grande do Sul, que podem aumentar o tempo total de deslocamento. Embora o percurso seja extenso, as boas condições de pavimentação e sinalização favorecem a segurança e a regularidade operacional da viagem.

Por fim, a rota 5 corresponde ao trajeto entre Crissiumal (RS) e Cruz Alta (RS), com extensão aproximada de 177,9 quilômetros, caracterizando-se como um percurso de curta distância dentro do território gaúcho. O itinerário compreende trechos das rodovias RS-210, RS-342 e BR-285, passando por municípios intermediários como Três Passos, Santo Augusto e Ijuí. A imagem da rota pode ser visualizada na Figura 10.

Figura 10: Rota entre Crissiumal (RS) x Cruz Alta (RS)



Fonte: Adaptado de *Google Maps* (2025).

De forma geral, a análise das rotas demonstra que todas possuem importância estratégica para o transporte de cargas, conectando diferentes regiões. Apesar das diferenças de distância e infraestrutura, os trajetos apresentam condições adequadas

de tráfego e contribuem para o escoamento eficiente da produção. Esse levantamento permite compreender melhor os custos e a dinâmica operacional, servindo de base para o planejamento e a otimização das viagens realizadas pelo motorista.

4.3.2 Distâncias, tempo de viagem e custos

A análise das distâncias e tempos de deslocamento das rotas permite compreender o impacto direto do percurso sobre o consumo de combustível e os custos operacionais do motorista. Para a estimativa de custos, foi adotado o consumo médio de combustível de 1,8 km/L, valor obtido a partir do acompanhamento dos abastecimentos realizados ao longo dos últimos 12 meses de operação. Nesse mesmo período, calculou-se o preço médio do diesel em R\$6,64 por litro, considerando notas fiscais e registros mensais de gastos com combustível.

Com base nesses parâmetros, foi determinado um custo médio de R\$3,69 por quilômetro rodado, obtido a partir da razão entre o preço médio do litro de diesel e o rendimento do veículo em quilômetros por litro. Esse valor representa uma estimativa do gasto variável com combustível em função da distância percorrida. Dessa forma, o custo médio calculado foi aplicado como referência padrão para estimar o dispêndio total de combustível em cada uma das rotas mapeadas, permitindo comparar o desempenho econômico entre diferentes trajetos e identificar a alternativa mais eficiente em termos de custo operacional, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Distâncias, custo médio e tempo de viagem

ROTA	DISTÂNCIA (km)	CUSTO MÉDIO COMBUSTÍVEL (R\$)	TEMPO MÉDIO DE VIAGEM
1	656,5	2.422,48	1 dia
2	1292	4.767,48	2,5 dias
3	1323	4.881,87	2,5 dias
4	946,5	3.492,58	1,5 dias
5	176,4	650,92	3 horas

Fonte: Autora (2025).

Conforme a Tabela 6, os resultados demonstram que as rotas de maior

extensão, especialmente as rotas 2, 3 e 4 concentram os maiores custos operacionais com combustível, refletindo diretamente na eficiência econômica das operações. Por outro lado, as rotas 1 e 5, são regionais e apresentam custos significativamente menores, tornando-se opções mais vantajosas para entregas locais.

A partir dos históricos de registros, foi possível observar que as variações do preço do diesel ao longo do período analisado impactam diretamente a rentabilidade da viagem, evidenciando a importância de um monitoramento contínuo dos custos variáveis. O tempo de viagem, por sua vez, influencia não apenas o consumo total, mas também o nível de produtividade do motorista, uma vez que trajetos longos reduzem o número de viagens realizadas mensalmente. Portanto, a correlação entre distância, custo médio de combustível e tempo permite compreender de forma mais precisa o desempenho operacional do transporte, contribuindo para o planejamento de rotas e cálculo de fretes.

4.4 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

O desenvolvimento dos modelos matemáticos fundamentou-se na aplicação da Pesquisa Operacional com o objetivo de determinar a rota de menor custo entre um ponto de origem e um destino final. O método adotado foi o Problema do Caminho Mínimo (PCM), que faz parte da classe dos problemas de otimização em redes. Essa abordagem permite identificar o trajeto mais econômico considerando variáveis como distância, custo do combustível, pedágios e manutenção do veículo. No caso do transporte rodoviário, essa técnica possibilita avaliar de forma objetiva as alternativas de rota, reduzindo custos e tempo de deslocamento. O modelo foi estruturado de forma sequencial, contemplando desde o levantamento dos custos até a implementação no *Solver* do *Excel*, conforme as etapas a seguir.

4.4.1 Levantamento de custos por quilômetro rodado

A primeira etapa para o desenvolvimento dos modelos matemáticos consistiu no levantamento detalhado de todos os custos por quilômetro rodado, com o objetivo de determinar o custo médio operacional do motorista autônomo. Essa etapa é essencial, pois permite mensurar o impacto financeiro de cada variável envolvida na atividade de transporte e fornece os parâmetros para a formulação dos modelos

matemáticos. Foram considerados custos variáveis, custos fixos e custos indiretos, obtidos por meio dos registros contábeis e operacionais do motorista ao longo dos últimos 12 meses e já descritos anteriormente. Os dados médios de desempenho do veículo e de quilometragem estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Dados médios de rendimento do veículo

DADOS	RENDIMENTO
KM por litro de combustível	1,8
Média de KM nos últimos 12 meses	9.212

Fonte: Autora (2025).

A partir dos dados da Tabela 7, foi possível determinar o custo médio de combustível e os demais custos operacionais por quilômetro rodado. Os custos variáveis englobam despesas que variam conforme o volume de atividade, como combustível, manutenção e pedágios. O combustível representa o item de maior impacto no transporte, sendo calculado pela relação entre o preço médio do diesel nos últimos 12 meses e o rendimento médio do caminhão, conforme a Equação 1:

$$C_{comb} = \frac{P_{DIESEL}}{R_{KM/L}} \quad (1)$$

Onde:

C_{comb} = Custo médio de combustível por km rodado

P_{diesel} = Preço médio do diesel (R\$/L)

$R_{KM/L}$ = Rendimento do veículo em quilômetros por litro.

Além disso, foram contabilizados os custos de manutenção relacionados ao desgaste natural de componentes mecânicos, pneus e sistemas elétricos, e os custos de pedágios, calculados conforme as tarifas vigentes em cada trecho percorrido. Os custos fixos como financiamento, depreciação e despesas administrativas foram distribuídos proporcionalmente à média de quilômetros rodados mensalmente, convertendo-se em custo médio por quilômetro. Já os custos indiretos, compostos por alimentação, tempo ocioso e imprevistos, foram incorporados ao cálculo total para representar as condições reais de operação do motorista. O resultado desse levantamento está apresentado na Tabela 7, que consolida os custos médios

associados ao transporte por quilômetro rodado.

Tabela 8: Custos associados ao transporte por KM rodado

CATEGORIA	VALOR (R\$/km)
Combustível	3,69
Manutenção	2,52
Financiamento	0,21
Depreciação	0,10
Despesas Administrativas	0,02
Alimentação	0,10
Tempo Ocioso	0,09
Imprevistos	0,04
Custo Total	6,80

Fonte: Autora (2025).

Com base nesses dados, o custo total médio por quilômetro rodado foi estimado em R\$6,80/km, valor que serviu como referência para o cálculo dos custos totais de cada rota inserida no modelo de otimização. Esse valor representa o somatório ponderado de todas as variáveis operacionais envolvidas na atividade do transporte, refletindo as condições reais de operação do motorista autônomo ao longo do período analisado.

Ao analisar a composição do custo por quilômetro, observa-se que os dois itens de maior impacto são o combustível (R\$3,69/km) e a manutenção (R\$2,52/km). Somados, esses elementos totalizam R\$6,21 por quilômetro, o que representa aproximadamente 91% de todo o custo operacional do caminhoneiro. Ou seja, praticamente todo o gasto ao rodar está concentrado no desempenho mecânico do veículo e no consumo de diesel. Diante disso, uma estratégia fundamental para reduzir despesas e aumentar a margem de lucro é planejar o abastecimento, buscando postos com menor preço por região, evitando abastecer em locais de alto custo e utilizando aplicativos de monitoramento de preço, além de manter uma condução eficiente que ajude a otimizar o consumo de combustível.

4.4.2 Levantamento das possíveis rotas

Após o levantamento dos custos médios por quilômetro rodado, foi realizada a identificação das rotas possíveis entre a origem e o destino final, com o objetivo de mapear as alternativas de deslocamento que poderiam ser percorridas pelo motorista. Essa etapa teve como finalidade compreender as diferentes combinações de trajetos viáveis, permitindo que posteriormente fosse analisada a rota de menor custo total, por meio da aplicação do modelo matemático do caminho mínimo.

O estudo considerou cinco rotas principais, selecionadas com base nas viagens realizadas com maior frequência pelo motorista ao longo do mês. A definição dessas rotas buscou representar os trajetos mais recorrentes e economicamente relevantes dentro da rotina operacional analisada, garantindo que o modelo matemático refletisse as condições reais do transporte.

A primeira rota analisada corresponde ao percurso entre a cidade de Crissiumal/RS e o destino final Rio Grande/RS, considerando as principais cidades de passagem e a quantidade de pedágios de cada percurso. Para a elaboração dessas rotas, foram utilizadas informações obtidas por meio de ferramentas de georreferenciamento (*Google Maps* e *DNIT*), experiência prévia do motorista, e consultas às principais rodovias federais e estaduais que conectam as cidades. Assim, foram estruturadas cinco possíveis rotas, conforme apresentadas na Tabela 9, que relaciona as cidades percorridas e o número de pedágios existentes em cada trajeto.

Tabela 9: Levantamento das possíveis rotas entre a origem e o destino final

POSSÍVEL ROTA	CIDADES PERCORRIDAS	QUANTIDADE DE PEDÁGIOS
1	Crissiumal - Humaitá - Bom Progresso - Campo Novo - Santo Augusto - Ijuí - Cruz Alta - Júlio de Castilhos - Santa Maria - São Sepé - Caçapava - Santana da Boa Vista - Canguçu - Pelotas - Rio Grande	2
2	Crissiumal - Humaitá - Bom Progresso - Campo Novo - Coronel Bicaco - Palmeira das Missões - Condor - Panambi - Cruz Alta - Júlio de Castilhos - Santa Maria - São Sepé - Caçapava - Santana da Boa Vista - Canguçu - Pelotas - Rio Grande	2
3	Crissiumal - Humaitá - Bom Progresso - Campo Novo - Coronel Bicaco - Palmeira das Missões - Barra Funda - Sarandi - Carazinho - Tio Hugo - Soledade - Marques de Souza - Lajeado - Estrela - Canoas - Porto Alegre - Camaquã - Cristal - São Lourenço do Sul - Pelotas - Rio Grande	8
4	Crissiumal - Humaitá - Bom Progresso - Campo Novo - Santo Augusto - Ijuí - Augusto Pestana - Jóia - Santiago - São Vicente do Sul - Santa Maria - São Sepé - Caçapava - Santana da Boa Vista - Canguçu - Pelotas - Rio Grande	2
5	Crissiumal - Humaitá - Bom Progresso - Campo Novo - Coronel Bicaco - Palmeira das Missões - Barra Funda - Sarandi - Carazinho - Tio Hugo - Soledade - Barros Cassal - Santa Cruz do Sul - Rio Pardo - Pantano Grande - Encruzilhada do Sul - Canguçu - Pelotas - Rio Grande	3

Fonte: Autora (2025).

Conforme a Tabela 9, o levantamento identificou cinco rotas distintas entre Crissiumal/RS e Rio Grande/RS, variando principalmente quanto à distância total e ao número de pedágios. Essas informações foram registradas para permitir a comparação entre os percursos e serviram como base para a etapa seguinte, na qual as cidades foram representadas em nós e as conexões diretas entre elas em arestas,

conforme a metodologia do Problema do Caminho Mínimo. A partir dessa estrutura, as informações coletadas foram inseridas em planilhas específicas para compor a matriz de custos, que serviu de base para a formulação e resolução do modelo no *Solver* do *Excel*, possibilitando identificar, de forma objetiva, a rota que apresenta o menor custo total entre o ponto de origem e o destino final.

4.4.3 Representação das cidades em nós e definição das ligações da rede

Com base nas rotas identificadas anteriormente, foi realizado o mapeamento das cidades que compõem o percurso entre Crissiumal/RS e Rio Grande/RS. Cada cidade foi representada por um nó (vértice), numerado de forma sequencial conforme a ordem de aparecimento nas rotas, facilitando a construção do modelo matemático. Essa etapa foi necessária para converter o problema real em uma estrutura de rede, permitindo a análise das conexões diretas entre os pontos e a mensuração das distâncias correspondentes. A Tabela 9 apresenta o número atribuído a cada cidade.

Tabela 10: Numeração dos nós correspondentes às cidades

CIDADE	NÓ	CIDADE	NÓ
Crissiumal	1	Soledade	22
Humaitá	2	Marques de Souza	23
Bom Progresso	3	Barros Cassal	24
Campo Novo	4	São Sepé	25
Coronel Bicaco	5	Lajeado	26
Santo Augusto	6	Santa Cruz do Sul	27
Palmeira das Missões	7	Caçapava do Sul	28
Ijuí	8	Estrela	29
Condor	9	Rio Pardo	30
Augusto Pestana	10	Santana da Boa Vista	31
Barra Funda	11	Canoas	32
Sarandi	12	Pantano Grande	33
Panambi	13	Canguçu	34
Cruz Alta	14	Porto Alegre	35
Jóia	15	Encruzilhada do Sul	36
Carazinho	16	Camaquã	37
Julio Castilhos	17	Cristal	38
Santiago	18	São Lourenço do Sul	39
Tio Hugo	19	Pelotas	40
Santa Maria	20	Rio Grande	41
São Vicente do Sul	21		

Fonte: Autora (2025).

Após a definição dos nós, foram identificadas as ligações diretas entre as cidades, considerando as distâncias médias obtidas por meio das ferramentas de georreferenciamento. Essas ligações correspondem às arestas do grafo, representando cada trecho percorrido entre duas cidades consecutivas. A Tabela 11 apresenta as conexões entre os nós e suas respectivas distâncias em quilômetros, servindo de base para o cálculo dos custos de transporte e para a aplicação do modelo de otimização.

Tabela 11: Ligações diretas e distâncias entre os nós

DE	PARA	DISTÂNCIA (KM)	DE	PARA	DISTÂNCIA (KM)
1	2	17,4	20	25	63,3
2	3	12,1	21	20	63,7
3	4	16,3	22	23	83,5
4	5	11,4	22	24	39,7
4	6	22,6	23	26	41,6
5	7	58,2	24	27	98,7
6	8	63,7	25	28	42,6
7	9	40,7	26	29	60,1
7	11	96,2	27	30	32,3
8	10	38,9	28	31	62,5
8	14	41,8	29	32	97,1
9	13	13	30	33	24,6
10	15	22,4	31	34	81,9
11	12	13,4	32	35	19
12	16	45,8	33	36	48
13	14	70,4	34	40	56,3
14	17	45,8	35	37	54,5
15	18	128,8	36	34	126,3
16	19	43,9	37	38	31
17	20	62,1	38	39	45,2
18	21	63,4	39	40	49,8
19	22	33,8	40	41	47

Fonte: Autora (2025).

A partir da Tabela 11, foi possível representar o sistema de transporte em forma

de rede, onde cada nó corresponde a uma cidade e cada aresta representa um trecho percorrido com sua respectiva distância. Essas informações foram utilizadas para o cálculo dos custos totais de cada rota e para a formulação do modelo matemático do Problema do Caminho Mínimo. A resolução do modelo matemático foi realizada por meio da ferramenta *Solver* do *Microsoft Excel*, a qual permite identificar a rota de menor custo de forma otimizada, considerando as variáveis e restrições previamente estabelecidas.

4.4.4 Levantamento dos custos por rota

Após o mapeamento das cidades e das ligações entre elas, foi realizado o levantamento de todos os custos envolvidos em cada trecho das rotas. Essa etapa teve como objetivo determinar o custo total de transporte entre nós, considerando as variáveis operacionais levantadas anteriormente e o custo médio por quilômetro rodado.

Com base nas distâncias entre as cidades e no valor médio por quilômetro, foram estimados os custos relacionados ao combustível, manutenção, financiamento, depreciação, despesas administrativas, alimentação, tempo ocioso e imprevistos, além dos valores de pedágio quando aplicáveis. O Apêndice A apresenta o modelo completo utilizado para o levantamento dos custos de transporte em cada ligação direta entre as cidades, tendo em vista que a tabela original possui grande extensão. Em cada trecho da rota, representado pelo par de cidades (De/Para), foram calculados os custos individuais por meio da multiplicação da distância percorrida pelo custo médio por quilômetro. Nos casos em que há cobrança de pedágios, o valor correspondente foi adicionado ao custo total do respectivo trecho, compondo assim o custo final da ligação.

Após o levantamento detalhado dos custos de cada trecho, foi elaborada uma nova planilha no *Microsoft Excel* para organizar as informações necessárias à aplicação do modelo matemático. Essa planilha teve como objetivo consolidar todos os dados de entrada do modelo, permitindo o cálculo do custo total de cada ligação e a identificação da rota mais econômica entre a origem e o destino final.

A planilha foi estruturada com os seguintes campos: De e Para, que indicam o ponto de origem e destino de cada trecho, correspondendo aos nós do grafo; Distância

(km), que representa a distância percorrida entre as cidades; Pedágio, que indica os valores aplicáveis em determinados trechos; Custo, que corresponde ao custo total para percorrer cada ligação, calculado com base no custo médio de R\$ 6,80 por quilômetro rodado, incluindo combustível, manutenção, depreciação, despesas administrativas, alimentação, tempo ocioso e imprevistos; e Rota Seleccionada, que identifica os trechos escolhidos pelo modelo como parte da rota de menor custo total. A Tabela 12 apresenta a consolidação dessas informações, utilizadas como entrada no modelo de otimização.

Tabela 12: Consolidação dos dados para o cálculo do custo total de cada rota

DE	PARA	DISTÂNCIA (KM)	PEDÁGIO	CUSTO TOTAL	ROTA SELECIONADA
1	2	17,4		R\$ 82,23	1
2	3	12,1		R\$ 110,77	1
3	4	16,3		R\$ 77,47	1
4	5	11,4		R\$ 153,58	0
4	6	22,6		R\$ 395,51	1
5	7	58,2		R\$ 432,89	0
6	8	63,7		R\$ 276,59	1
7	9	40,7		R\$ 653,75	0
7	10	96,2		R\$ 264,35	0
8	11	38,9		R\$ 284,06	0
8	13	41,8		R\$ 88,34	1
9	12	13		R\$ 152,22	0
10	14	22,4		R\$ 91,06	0
11	15	13,4		R\$ 311,25	0
12	13	45,8		R\$ 478,42	0
13	18	70,4		R\$ 311,25	1
14	16	45,8		R\$ 875,29	0
15	17	128,8		R\$ 454,53	0
16	19	43,9	R\$ 156,20	R\$ 422,02	0
17	20	62,1		R\$ 430,85	0
18	21	63,4		R\$ 229,70	1
19	22	33,8		R\$ 430,17	0
20	21	63,3		R\$ 432,89	0
21	23	63,7		R\$ 723,65	1
22	24	83,5	R\$ 156,20	R\$ 269,79	0
22	25	39,7		R\$ 282,70	0
23	26	41,6		R\$ 670,74	1
24	27	98,7		R\$ 289,50	0

25	28	42,6		R\$ 408,42	0
26	31	60,1		R\$ 219,50	1
27	29	32,3		R\$ 424,73	0
28	30	62,5		R\$ 793,07	0
29	32	97,1	R\$ 133,20	R\$ 167,18	0
30	33	24,6		R\$ 556,57	0
31	35	81,9		R\$ 285,32	1
32	36	19	R\$ 156,20	R\$ 326,20	0
33	34	48		R\$ 538,80	0
34	35	56,3	R\$ 156,20	R\$ 370,37	0
35	40	54,5		R\$ 858,30	1
36	37	126,3		R\$ 366,87	0
37	38	31	R\$ 156,20	R\$ 463,37	0
38	39	45,2	R\$ 156,20	R\$ 494,63	0
39	40	49,8	R\$ 156,20	R\$ 475,60	0
40	41	47	R\$ 156,20	R\$ 82,23	1

Fonte: Autora (2025).

Além desta planilha, foi elaborada outra tabela destinada à definição do fluxo líquido de cada nó, utilizada para configurar as restrições do modelo no *Solver*. Essa estrutura foi necessária para representar a conservação de fluxo entre os pontos de origem e destino, garantindo que o caminho formado fosse contínuo e único.

Na planilha, cada nó representa uma cidade pertencente ao grafo. O campo Fluxo Líquido indica a diferença entre o fluxo que entra e o que sai de cada nó. O valor -1 foi atribuído ao nó de origem (Crissiumal/RS), representando a oferta; o valor +1 ao nó de destino (Rio Grande/RS), representando a demanda; e o valor 0 aos nós intermediários, que apenas transmitem o fluxo. Já a coluna Oferta/Demanda classifica cada nó de acordo com sua função dentro da rede. O apêndice II apresenta a estrutura utilizada para essa definição.

A Tabela 11 e o apêndice II serviram como base para a formulação do modelo matemático de otimização, para posterior resolução por meio do *Solver*. A primeira forneceu os custos associados a cada trecho da rede, compondo a função objetivo, enquanto a segunda permitiu a definição das restrições de fluxo, que garantem que o transporte ocorra apenas em um sentido, partindo do ponto de origem e chegando ao destino. Com isso, o *Solver* pôde processar os dados e determinar a rota de menor custo total entre Crissiumal/RS e Rio Grande/RS.

Após a consolidação dos dados de distância, pedágio e custo total de cada ligação, iniciou-se a etapa de cálculo e aplicação das fórmulas necessárias para a

resolução do modelo matemático no *Microsoft Excel*. Essa fase teve como objetivo preparar a base de dados para a utilização do suplemento *Solver*, responsável por determinar a rota de menor custo total entre os pontos definidos.

Para o cálculo da distância total percorrida, foi utilizada a função SOMARPRODUTO, que permite multiplicar os valores de duas colunas correspondentes e somar seus resultados. Assim, a fórmula foi aplicada sobre uma nova célula denominada “Distância total”, com as colunas Distância (km) e Rota Selecionada, permitindo que fossem somadas apenas as distâncias efetivamente pertencentes ao trajeto identificado como ótimo. A fórmula utilizada foi:

=SOMARPRODUTO(Distância; Rota Selecionada)

Essa expressão resultou na distância total percorrida pelo motorista na rota ótima, considerando exclusivamente os trechos ativos do modelo (aqueles marcados com o valor 1 na coluna Rota Selecionada). Em seguida, foi calculado o fluxo líquido de cada nó, com o intuito de validar a conservação do fluxo dentro da rede de transporte. Para isso, utilizou-se a combinação das funções SOMASE aplicadas às colunas DE e PARA, de forma a contabilizar o número de ligações que entram e saem de cada nó. O cálculo do fluxo líquido foi realizado pela diferença entre as somas dos trechos que chegam e saem de um mesmo nó, conforme a fórmula:

=SOMASE(Coluna PARA; NO'; Rota_Selecionada) - SOMASE(Coluna_DE; NO'; Rota_Selecionada)

Essa operação permitiu identificar corretamente os nós de origem (com valor -1), destino (com valor +1) e intermediários (com valor 0), garantindo a coerência da estrutura do modelo de rede e a viabilidade da solução proposta pelo *Solver*. Com todas as fórmulas aplicadas e validadas, os dados foram inseridos no suplemento *Solver*, conforme a Figura 11.

Figura 11: Configuração do Solver

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo:

Para: Máx. Mín. Valor de:

Alterando Células Variáveis:

Sujeito às Restrições:

Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de Solução:

Método de Solução

Selecione o mecanismo GRG Não Linear para Problemas do Solver suaves e não lineares. Selecione o mecanismo LP Simplex para Problemas do Solver lineares. Selecione o mecanismo Evolutionary para problemas do Solver não suaves.

Fonte: Autora (2025).

Na janela de parâmetros do Solver (Figura 11), a célula definida como objetivo corresponde àquela onde foi calculada a distância total do trajeto, representada pela fórmula SOMARPRODUTO, que relaciona as distâncias entre os pontos e as variáveis de decisão. Dessa forma, em “Definir Objetivo”, foi selecionada a célula G48, e escolhida a opção minimizar (Mín), buscando reduzir o valor total da distância.

Na seção “Alterando Células Variáveis”, foram selecionadas as células correspondentes às variáveis de decisão da rota, compreendendo o intervalo G3:G46. Essas células representam as escolhas possíveis de percurso entre os diferentes pontos do trajeto, sendo os valores ajustados automaticamente pelo Solver durante o processo de otimização.

Em “Sujeito às Restrições”, foram adicionadas as condições necessárias para garantir o equilíbrio do modelo, relacionando as células de fluxo mínimo com as de oferta e demanda. Assim, definiu-se que o total de saída e entrada de cada ponto deveria ser igual, representado pela restrição J3:J43 = K3:K43. Essa condição assegura que todas as demandas sejam atendidas e que o fluxo da rota seja viável.

Por fim, foi marcada a opção “Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas”, garantindo que as variáveis assumem apenas valores positivos, e selecionado o

método de solução *LP Simplex*, apropriado para problemas de programação linear. Após essas configurações, o *Solver* foi executado para encontrar a combinação ótima de rotas que resultasse na menor distância total possível. A imagem do modelo matemático estruturado no *Excel* pode ser visualizada na Figura 12.

Figura 12: Estrutura do modelo no *Excel*

CIDADE	NÓ	DE	PARA	DISTÂNCIA (KM)	Rota selecionada	Nó	Fluxo Líquido	Oferta Demanda
Crissiumal	1	1	2	17.4	1	1	-1	-1
Humaitá	2	2	3	12.1	1	2	0	0
Bom Progresso	3	3	4	16.3	1	3	0	0
Campo Novo	4	4	5	11.4	0	4	0	0
Coronel Bicaco	5	4	6	22.6	1	5	0	0
Santo Augusto	6	5	7	58.2	0	6	0	0
Palmeira das	7	6	8	63.7	1	7	0	0
Ijuí	8	7	9	40.7	0	8	0	0
Condor	9	7	10	96.2	0	9	0	0
Barra Funda	10	8	11	38.9	0	10	0	0
Augusto Pestana	11	8	13	41.8	1	11	0	0
Panambi	12	9	12	13	0	12	0	0
Cruz Alta	13	10	14	22.4	0	13	0	0
Sarandi	14	11	15	13.4	0	14	0	0
Joia	15	12	13	45.8	0	15	0	0
Carazinho	16	13	18	70.4	1	16	0	0
Santiago	17	14	16	45.8	0	17	0	0
Julio de Castilhos	18	15	17	128.8	0	18	0	0
Tio Hugo	19	16	19	43.9	0	19	0	0
São Vicente do	20	17	20	62.1	0	20	0	0
Santa Maria	21	18	21	63.4	1	21	0	0
Soledade	22	19	22	33.8	0	22	0	0
São Sepé	23	20	21	63.3	0	23	0	0
Marques de	24	21	23	63.7	1	24	0	0
Barros Cassal	25	22	24	83.5	0	25	0	0
Cacapava do Sul	26	22	25	39.7	0	26	0	0
Lajeado	27	23	26	41.6	1	27	0	0
Santa Cruz do Sul	28	24	27	98.7	0	28	0	0
Estrela	29	25	28	42.6	0	29	0	0
Rio Pardo	30	26	31	60.1	1	30	0	0
Santana da Boa	31	27	29	32.3	0	31	0	0
Canoas	32	28	30	62.5	0	32	0	0
Pantano Grande	33	29	32	97.1	0	33	0	0
Encruzilhada do	34	30	33	24.6	0	34	0	0
Canquic	35	31	35	81.9	1	35	0	0
Porto Alegre	36	32	36	19	0	36	0	0
Camuaquã	37	33	34	48	0	37	0	0
Cristal	38	34	35	56.3	0	38	0	0
São Lourenço do	39	35	40	54.5	1	39	0	0
Pelotas	40	36	37	126.3	0	40	0	0
Rio Grande	41	37	38	31	0	41	1	1
		38	39	45.2	0			
		39	40	49.8	0			
		40	41	47	1			
Distância total					656,5			

Fonte: Autora (2025).

Conforme a Figura 12, a tabela à esquerda reúne todas as cidades enumeradas com seus respectivos nós, facilitando a identificação de cada ponto da rede. No centro da figura está a tabela de distâncias, que representa a matriz de arcos entre os pontos visitados; cada linha indica um deslocamento possível, contendo as colunas “De”, “Para” e a distância em quilômetros. A última coluna, intitulada “Rota selecionada”, corresponde à variável de decisão do modelo, onde o *Solver* atribui valor 1 para os

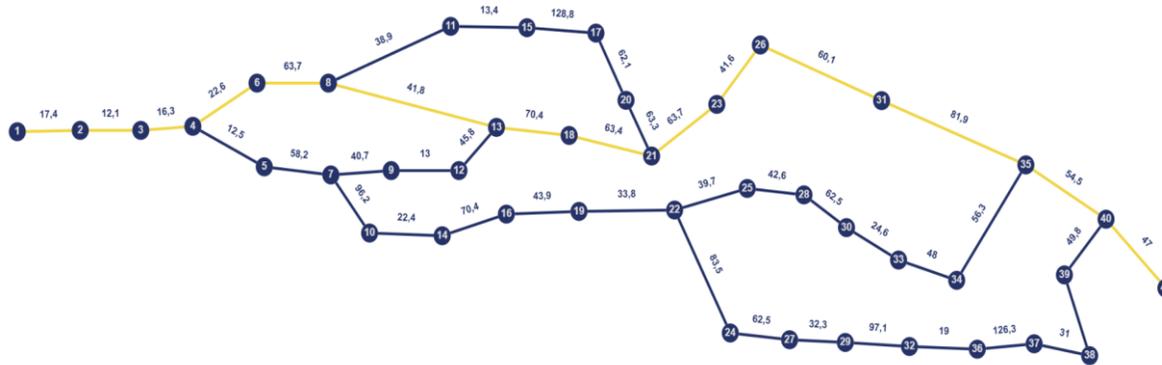
trechos incluídos na solução final e 0 para os demais.

Ainda, as linhas destacadas são aquelas em que o *Solver* retornou valor 1, evidenciando os arcos que compõem a rota ótima e funcionando como um registro visual do caminho escolhido para minimizar a distância total percorrida. Por fim, à direita encontra-se a tabela de fluxo líquido, que representa as restrições de conservação de fluxo para cada cidade: nela, o valor -1 identifica o ponto de partida, o valor +1 o ponto de chegada e os demais nós apresentam fluxo zero, garantindo que o motorista entre e saia de cada local intermediário apenas uma vez e permitindo que a rota seja contínua, sem desvios ou ciclos indesejados.

Por fim, a aplicação da ferramenta *Solver* possibilitou identificar a rota mais eficiente entre a cidade de origem e o destino final, considerando simultaneamente os critérios de menor custo operacional e menor distância total percorrida. Com base na otimização realizada, verificou-se que a rota mais vantajosa é composta pelo seguinte trajeto: Crissiumal - Humaitá - Bom Progresso - Campo Novo - Santo Augusto - Ijuí - Cruz Alta - Júlio de Castilhos - Santa Maria - São Sepé - Caçapava do Sul - Santana da Boa Vista - Canguçu - Pelotas - Rio Grande.

Essa configuração resultou em uma distância total de 656,5 km e um custo total estimado de R\$4.617,61, representando a alternativa que minimiza o custo da operação de transporte, mantendo a eficiência do percurso e reduzindo o consumo de combustível, o tempo de deslocamento e o desgaste do veículo. A rota obtida foi representada graficamente por meio de um grafo, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13: Grafo representando a rota ótima determinada pelo *Solver*



Fonte: Autora (2025).

De acordo com a Figura 13, cada nó corresponde a uma cidade, e as arestas indicam as conexões diretas entre os pontos, acompanhadas das respectivas distâncias em quilômetros. A rota ótima, destacada em amarelo, evidencia o caminho de menor custo e distância entre o ponto de origem (Crissiumal) e o destino final (Rio Grande), conforme determinado pelo *Solver*.

A partir da distância total obtida, procedeu-se à estimativa do tempo de deslocamento correspondente, considerando uma velocidade média de 70 km/h, valor adotado por representar uma velocidade operacional compatível com condições de rodovias pavimentadas e tráfego regular. O tempo total de viagem foi calculado pela relação entre distância e velocidade média, conforme a equação 2.

$$Tempo (h) = \frac{Distância (km)}{Velocidade média (km/h)} \quad (2)$$

Substituindo-se os valores, obteve-se 9,378 horas, o que corresponde a aproximadamente 9 horas e 22 minutos de deslocamento contínuo. Esse resultado representa o tempo teórico de viagem, considerando uma velocidade constante e ausência de paradas operacionais. Entretanto, de acordo com os dados obtidos durante a análise prática, o tempo total efetivo registrado foi de 11 horas e 20 minutos, indicando uma diferença de aproximadamente 40 minutos a mais em relação ao tempo teórico. Essa variação é justificada por fatores operacionais e externos, como paradas para abastecimento, alimentação e descanso, além de trechos com tráfego mais intenso, variações no relevo, curvas e condições climáticas adversas que exigem redução de velocidade.

Com base nesse tempo real, a velocidade média efetiva observada foi de aproximadamente 56,5 km/h, e essa diferença entre o tempo teórico e o tempo efetivo reforça a importância de considerar fatores práticos no planejamento de rotas, pois o tempo de deslocamento está sujeito a variações decorrentes de elementos externos ao modelo matemático. Assim, a rota identificada pelo *Solver* demonstrou-se como a alternativa mais econômica e operacionalmente viável, resultando em um percurso total de 656,5 km, custo de R\$4.617,61 e tempo total efetivo de aproximadamente 11 horas e 20 minutos. Esses resultados evidenciam o equilíbrio entre custo, distância e tempo de deslocamento, reforçando a eficiência do modelo de otimização proposto e a aplicabilidade do método na análise de rotas logísticas.

Ademais, a Tabela 13 apresenta os resultados consolidados obtidos com a aplicação dos modelos matemáticos desenvolvidos neste estudo, que permitiu calcular as distâncias e os custos totais de cada rota analisada. As rotas analisadas correspondem a trajetos efetivamente percorridos pelo motorista, permitindo comparar o trajeto otimizado, calculado pelo modelo com o trajeto real executado na prática.

Tabela 13: Distâncias e custos totais das rotas

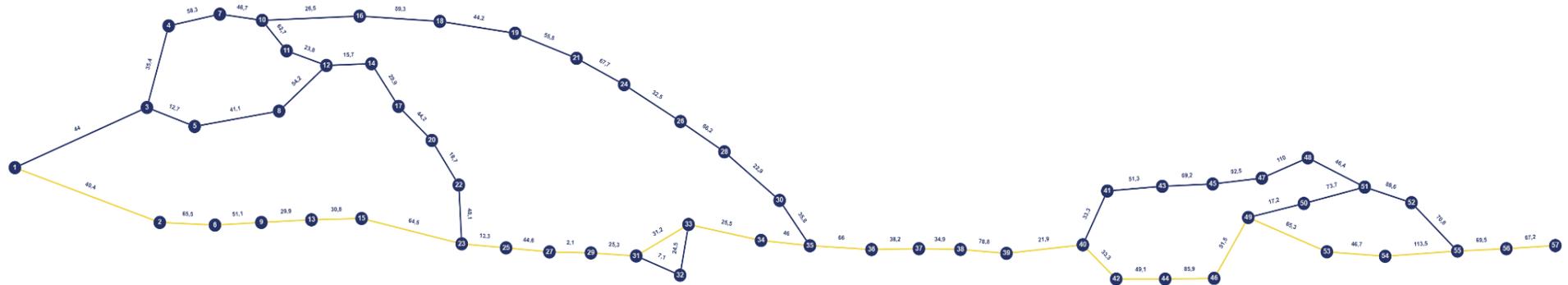
ROTA	CIDADES PERCORRIDAS	DISTÂNCIA (KM)	CUSTO TOTAL
2	Cruz Alta (RS) - Ijuí (RS) - Santo Augusto (RS) - Três Passos (RS) - Tenente Portela (RS) - Itapiranga (SC) - São Miguel do Oeste (SC) - Guaraciaba (SC) - Dionísio Cerqueira (SC) - Barracão (PR) - Santo Antônio do Sudoeste (PR) - Pérola d'Oeste (PR) - Capanema (PR) - Capitão Leônidas Marques (PR) - Cascavel (PR) - Toledo (PR) - Marechal Cândido Rondon (PR) - Mundo Novo (MS) - Eldorado (MS) - Itaquiraí (MS) - Naviraí (MS) - Caarapó (MS) - Dourados (MS) - Rio Brilhante (MS) - Nova Alvorada do Sul (MS) - Campo Grande (MS) - Bandeirantes (MS) - São Gabriel do Oeste (MS)	1292	R\$9.889,45
3	Rio Grande (RS) - Pelotas (RS) - Canguçu (RS) - Santana da Boa Vista (RS) - Caçapava do Sul (RS) - São Sepé (RS) - Santa Maria (RS) - Júlio de Castilhos (RS) - Cruz Alta (RS) - Panambi (RS) - Condor (RS) - Palmeira das Missões (RS) - Boa Vista das Missões (RS) - Seberi (RS) - Frederico Westphalen (RS) - Iraí (RS) - Cunha Porã (SC) - Maravilha (SC) - Bom Jesus do Oeste (SC) - Saltinho (SC) - Campo Erê (SC) - Marmeleiro (PR) - Francisco Beltrão (PR) - Ampére (PR) - Realeza (PR) - Capitão Leônidas Marques (PR) - Cascavel (PR) - Toledo (PR) - Marechal Cândido Rondon (PR) - Nova Santa Rosa (PR) - Guaíra (PR) - Mundo Novo (MS) - Dourados (MS) - Iguatemi (MS) - Tacuru (MS) - Sete Quedas (MS)	1320,2	R\$9.452,58
4	Antônio João (MS) - Ponta Porã (MS) - Iguatemi (MS) - Mundo Novo (MS) - Guaíra (PR) - Marechal Cândido Rondon (PR) - Toledo (PR) - Cascavel (PR) - Capitão Leônidas Marques (PR) - Realeza (PR) - Marmeleiro (PR) - Dionísio Cerqueira (SC) - Guaraciaba	946,5	R\$8.576,14

	(SC) - São José do Cedro (SC) - São Miguel do Oeste (SC) - Descanso (SC) - Itapiranga (SC) - Tenente Portela (RS) - Três Passos (RS) - Crissiumal (RS) - Nova Candelária (RS)		
5	Crissiumal (RS) - Boa Vista do Buricá (RS) - Três de Maio (RS) - Independência (RS) - Catuípe (RS) - Ijuí (RS) - Cruz Alta (RS)	176,4	R\$1.198,77

Fonte: Autora (2025).

Conforme a Tabela 13, observa-se que as distâncias e os custos calculados variam de acordo com as características de cada rota e a extensão do trajeto. A primeira rota analisada, que liga Cruz Alta (RS) a São Gabriel do Oeste (MS), totaliza 1.292 quilômetros e apresenta um custo total de R\$9.889,45. Esse percurso, obtido por meio do modelo matemático, corresponde a uma das principais rotas de longa distância realizadas pelo motorista, atravessando quatro estados: Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e Mato Grosso do Sul. O grafo da rota pode ser visualizado na Figura 14.

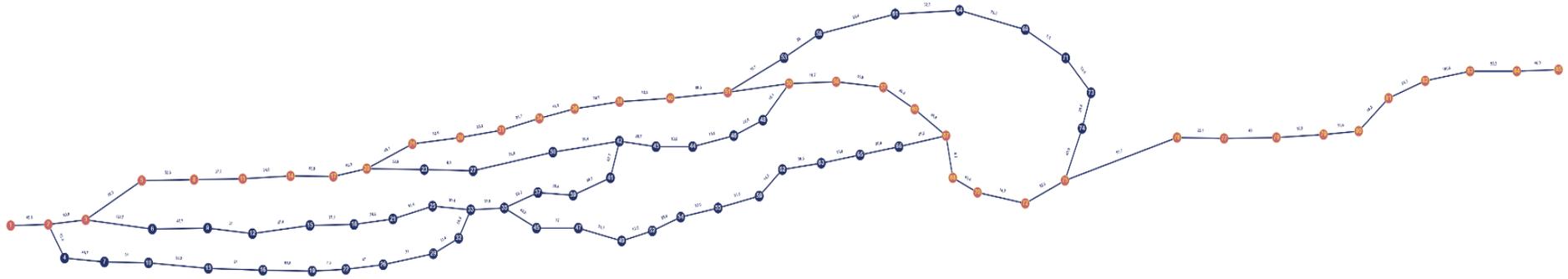
Figura 14: Grafo da rota Cruz Alta (RS) à São Gabriel do Oeste (MS)



Fonte: Autora (2025).

Conforme a Figura 14, o trajeto otimizado mostrou-se praticamente idêntico ao percurso atualmente realizado, apresentando apenas pequenas variações intermediárias, sem impacto significativo nos custos. Esse resultado confirma a precisão e aplicabilidade prática do modelo, que permite ao motorista atualizar seus custos conforme as variações de preço do combustível e rendimento do veículo. Já a segunda rota, compreendida entre Rio Grande (RS) e Sete Quedas (MS), totalizou 1.320,2 km de extensão e custo total de R\$9.452,58, conforme os cálculos do modelo. A representação do grafo pode ser observada na Figura 15.

Figura 15: Grafo da rota Rio Grande (RS) à Sete Quedas (MS)

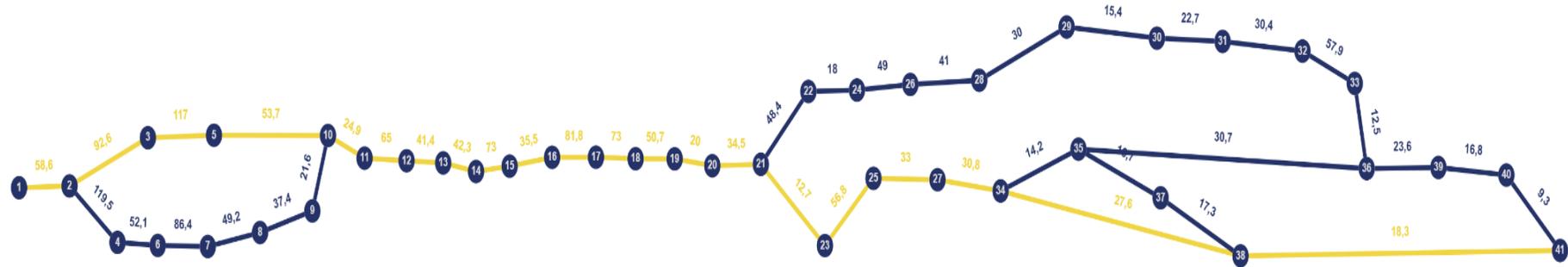


Fonte: Autora (2025).

Conforme a Figura 15, essa rota é amplamente utilizada para o transporte de fertilizantes e grãos entre o Sul e o Centro-Oeste, o que reforça sua importância logística. Os resultados obtidos mostram que o modelo reproduziu de forma consistente as condições reais desse trajeto, confirmando sua aplicabilidade na análise e comparação de rotas longas e economicamente relevantes.

A rota seguinte, entre Antônio João (MS) e Nova Candelária (RS), apresentou 946,5 km de extensão e custo total de R\$8.576,14, também calculados pelo modelo matemático. Essa viagem, que geralmente ocorre no sentido de retorno ao estado de origem, é frequentemente realizada com carga parcial, mantendo os custos fixos, mas com menor aproveitamento de receita. A representação do grafo pode ser visualizada na Figura 16.

Figura 16: Grafo da rota Antônio João (MS) à Nova Candelária (RS)



Fonte: Autora (2025).

Conforme a Figura 16, o percurso identificado pelo modelo coincide integralmente com o trajeto executado na prática, o que reforça a consistência e aplicabilidade do método proposto para a estimativa de custos reais. Esse resultado demonstra que o modelo é eficaz não apenas para trajetos longos, mas também para viagens de retorno, oferecendo suporte na formação de preços de frete mais adequados e no planejamento financeiro das operações.

Por fim, a rota de Crissiumal (RS) a Cruz Alta (RS) apresentou 176,4 km de extensão e custo total de \$1.198,77, valores igualmente obtidos por meio do modelo matemático. Essa é uma das rotas de menor extensão, mas de maior frequência nas atividades do motorista, e os resultados confirmam a coerência e precisão do método utilizado. A visualização do grafo referente a esse trajeto é apresentada na Figura 17.

Figura 17: Grafo da rota de Crissiumal (RS) à Cruz Alta (RS)



Fonte: Autora (2025).

Os resultados apresentados evidenciam a capacidade do modelo matemático em estimar de forma precisa as distâncias e custos totais das rotas analisadas. A aplicação da otimização permitiu representar cada percurso de maneira sistematizada, oferecendo subsídios para a análise detalhada dos custos operacionais e para o planejamento logístico das viagens.

4.4.5 Análise comparativa dos custos totais

Antes da aplicação do modelo, o motorista avaliava a viabilidade do frete considerando apenas o gasto com combustível, adotando um custo médio de R\$3,64 por quilômetro como base para suas decisões. Assim, para a rota de Cruz Alta (RS) a São Gabriel do Oeste (MS), por exemplo, de 1.292 km, ele estimava um custo total aproximado de R\$4.703,88, valor que não refletia os demais elementos operacionais envolvidos no transporte.

Ademais, com a implementação do modelo proposto, verificou-se que o custo real por quilômetro é de R\$6,80, que somados com os custos de pedágio eleva o custo total da mesma rota para R\$9.889,45. Esse comparativo evidencia a diferença significativa

entre o cálculo simplificado utilizado anteriormente e o custo efetivo da operação, demonstrando a importância de considerar todas as variáveis que compõem o processo logístico para uma tomada de decisão mais precisa e sustentável.

A partir da comparação entre os valores obtidos pelo modelo matemático e os registros de deslocamento extraídos do tacógrafo do caminhão, foi possível identificar com precisão as diferenças de distância e custo entre os trajetos otimizados e aqueles efetivamente executados pelo motorista. Essa análise permitiu mensurar o impacto financeiro decorrente de pequenas variações de percurso, sobretudo nas rotas realizadas com maior frequência, evidenciando a relevância da otimização de trajetos para a redução de custos operacionais. O comparativo entre os custos totais atuais e otimizados pode ser visualizado na Tabela 14.

Tabela 14: Comparativo entre custos totais atuais e otimizados

ROTA	DISTÂNCIA ATUAL (KM)	DISTÂNCIA OTIMIZADA	DIFERENÇA (KM)	CUSTO ATUAL (R\$)	CUSTO OTIMIZADO	DIFERENÇA (R\$)	ECONOMIA (%)
Crissiumal (RS) - Rio Grande (RS)	656,5	656,5	-	4.617,61	4.617,61		
Cruz Alta (RS) - São Gabriel do Oeste (MS)	1292	1292	-	9.889,45	9.889,45		
Rio Grande (RS) - Sete Quedas (MS)	1345	1320,2	-24,8	9.621,22	9.452,58	168,64	1,75%
Antônio João (MS) - Nova Candelária (RS)	946,5	946,5	-	8.576,14	8.576,14		

Crissiumal (RS) - Cruz Alta (R\$)	188,4	176,4	-12	1.281,12	1.198,77	82,35	6,43%
---	-------	-------	-----	----------	----------	-------	-------

Fonte: Autora (2025).

Conforme a Tabela 14, a rota que conecta Crissiumal (RS) a Rio Grande (RS) apresenta distância atual e otimizada idênticas, ambas com 656,5 km, resultando no mesmo custo total de R\$4.617,61. Como não há diferença entre o percurso realizado e o sugerido pelo modelo, não se observa variação financeira nessa rota, indicando que o motorista já utiliza o trajeto mais eficiente. De modo semelhante, a rota entre Cruz Alta (RS) e São Gabriel do Oeste (MS) também não apresenta divergências entre a distância percorrida (1.292 km) e a distância otimizada. Consequentemente, o custo atual (R\$9.889,45) permanece igual ao custo otimizado, não havendo economia ou impacto adicional por viagem, o que reforça a adequação do trajeto utilizado.

Por outro lado, na rota Rio Grande (RS) à Sete Quedas (MS), observa-se uma diferença significativa: enquanto o modelo aponta uma distância otimizada de 1.320,2 km, os registros reais indicam um percurso 24,8 km maior, totalizando 1.345 km. Essa variação gera um acréscimo de R\$168,64 por viagem. Por se tratar de uma rota recorrente, realizada em média cinco vezes por mês, essa diferença gera um impacto acumulado de aproximadamente R\$843,20 mensais, o que representa cerca de R\$ 10.118,40 ao ano, indicando que a adoção do trajeto otimizado resultaria em economia direta ao motorista.

Por fim, na rota entre Crissiumal (RS) e Cruz Alta (RS), o motorista percorre 188,4 km, enquanto o modelo sugere um caminho reduzido de 176,4 km, representando uma diferença de 12 km. Essa redução refletiria em uma economia de R\$82,35 por viagem, equivalente a 6,43% do custo total. Considerando que essa rota também é realizada, em média, cinco vezes por mês, o

impacto acumulado da diferença alcança cerca de R\$411,75 mensais, totalizando R\$4.941,00 ao ano, evidenciando o potencial financeiro da adesão ao trajeto otimizado.

Os resultados demonstram que diferenças aparentemente pequenas, registradas entre os trajetos ideais e os efetivamente percorridos, podem gerar custos adicionais significativos ao longo do tempo. Os modelos propostos mostraram-se eficazes tanto na identificação dessas variações quanto na estimativa dos impactos financeiros decorrentes, configurando-se como uma ferramenta valiosa para o planejamento operacional e o controle de despesas do motorista autônomo.

4.4.6 Testes de sensibilidade e validação do modelo

Com o objetivo de verificar a robustez do modelo desenvolvido e sua aplicabilidade em diferentes condições econômicas, foram realizados testes de sensibilidade considerando variações nos principais componentes de custo do transporte: combustível, pedágios e eficiência do veículo. Essa etapa foi essencial para avaliar o comportamento do modelo diante de possíveis oscilações no mercado, assegurando que as rotas otimizadas continuem economicamente vantajosas mesmo em cenários de instabilidade.

Inicialmente, foram definidos três cenários de análise: O primeiro simulou um aumento de 10% no preço do combustível, refletindo uma condição comum de reajuste nos custos operacionais. O segundo cenário representou uma redução de 5% na eficiência do veículo, isto é, um maior consumo de combustível por quilômetro rodado. Por fim, o terceiro cenário combinou as duas situações anteriores, adicionando ainda uma elevação de 20% nas tarifas de pedágio, compondo assim um cenário adverso completo. Para cada um desses casos, foram recalculados os custos totais das rotas otimizadas e comparados com os valores correspondentes às rotas atualmente praticadas, conforme a Tabela 15.

Tabela 15: Resultados dos testes de sensibilidade dos custos totais

ROTA	CENÁRIO	CUSTO OTIMIZADO (R\$)	CUSTO ATUAL (R\$)	DIFERENÇA (R\$)
Crissiumal (RS) - Cruz Alta (RS)	Base	1.198,77	1.281,12	82,35
Crissiumal (RS) - Cruz Alta (RS)	Aumento de 10% combustível	1.247,53	1.333,23	85,70
Crissiumal (RS) - Cruz Alta (RS)	-5% eficiência	1.228,85	1.313,27	84,42
Crissiumal (RS) - Cruz Alta (RS)	Aumento de 10% combustível +20% pedágio	1.263,10	1.349,87	86,77
Rio Grande (RS) - Sete Quedas (MS)	Base	9.452,58	9.588,32	135,74
Rio Grande (RS) - Sete Quedas (MS)	Aumento de 10% combustível	10.397,84	10.547,15	149,31
Rio Grande (RS) - Sete Quedas (MS)	-5% eficiência	9.925,21	10.067,74	142,53
Rio Grande (RS) - Sete Quedas (MS)	Aumento de 10% combustível +20% pedágio	10.481,44	10.631,95	150,51

Fonte: Autora (2025).

Conforme apresentado na Tabela 15, os resultados indicam que, mesmo com o aumento de 10% no preço do combustível, as rotas otimizadas permaneceram mais econômicas do que as rotas atualmente percorridas. Na rota de Crissiumal (RS) a Cruz Alta (RS), o custo total passou de R\$1.198,77 para R\$1.247,53, ao passo que o trajeto atual aumentou de R\$1.281,12 para R\$1.333,23. Dessa forma, a economia entre os dois percursos manteve-se próxima de 6%, evidenciando a estabilidade do modelo diante de oscilações no preço do combustível. Na rota de Rio Grande (RS) a Sete Quedas (MS), observou-se comportamento semelhante: o custo otimizado passou de R\$ 9.452,58 para R\$ 10.397,84, enquanto o custo atual aumentou de R\$ 9.588,32 para R\$ 10.547,15, mantendo uma relação proporcional de economia.

Quando simulada a redução de 5% na eficiência do veículo, condição que implica maior consumo de combustível por quilômetro rodado, verificou-se que a diferença entre os custos das rotas permaneceu praticamente inalterada. Na rota de Crissiumal (RS) a Cruz Alta (RS), o custo otimizado atingiu R\$1.228,85, enquanto o

custo atual chegou a R\$1.313,27. Já na rota de Rio Grande (RS) a Sete Quedas (MS), o custo otimizado foi de R\$9.925,21, em comparação aos R\$10.067,74 observados na rota atual. Esse comportamento reforça que o modelo mantém sua eficiência mesmo diante de condições operacionais menos favoráveis.

No cenário combinado, que considerou simultaneamente o aumento de 10% no combustível e o acréscimo de 20% nas tarifas de pedágio, o modelo novamente apresentou consistência. As rotas otimizadas continuaram resultando em menores custos totais, demonstrando capacidade de absorver alterações conjuntas em variáveis de forte impacto financeiro. Na rota de Crissiumal (RS) a Cruz Alta (RS), o custo otimizado passou para R\$1.263,10, enquanto o custo atual aumentou para R\$1.349,87. No trajeto de Rio Grande (RS) a Sete Quedas (MS), o custo otimizado atingiu R\$10.481,44, enquanto o atual chegou a R\$10.631,95. Assim, as análises realizadas mostram que as recomendações de rota permanecem válidas e vantajosas, independentemente das flutuações nos preços de insumos.

Esses resultados reforçam a robustez do método proposto e sua aplicabilidade em contextos reais de oscilação de custos. Além disso, a utilização dos modelos matemáticos permite ao motorista uma visão completa e realista da operação, superando a prática anterior, em que apenas uma parcela dos gastos era considerada. Com isso, torna-se possível avaliar com maior precisão a viabilidade econômica de aceitar ou não um frete, levando em conta todos os fatores relevantes. Outro ponto essencial é a importância de garantir um frete de retorno, pois, caso o motorista precise retornar com o caminhão vazio, o custo da operação praticamente dobra, já que a quilometragem total será percorrida novamente sem geração de receita.

Por fim, destaca-se que todos os modelos matemáticos desenvolvidos neste estudo serão disponibilizados ao proprietário, acompanhados do treinamento necessário para sua operacionalização e interpretação. O motorista receberá orientações sobre como atualizar periodicamente os custos de operação, inserir novos valores de combustível, pedágio e manutenção, além de ajustar os parâmetros conforme a realidade de cada rota. Dessa forma, assegura-se que o usuário tenha autonomia para utilizar a ferramenta de maneira contínua, mantendo o controle atualizado dos custos e tomando decisões mais assertivas sobre a aceitação de fretes e a viabilidade econômica das operações.

CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo geral desenvolver um modelo de gestão de custos e otimização de rotas para um motorista autônomo, por meio da aplicação de técnicas de programação linear, a fim de aprimorar o controle financeiro e aumentar a eficiência operacional no transporte rodoviário de cargas. Esse objetivo foi plenamente atingido mediante a construção de modelos matemáticos estruturados com base em dados reais do motorista estudado, permitindo estimar com precisão os custos envolvidos e identificar rotas economicamente mais vantajosas.

Além do objetivo geral, os objetivos específicos também foram alcançados ao longo da pesquisa. Inicialmente, realizou-se o mapeamento e levantamento detalhado das rotas percorridas, bem como de todas as despesas associadas, o que possibilitou compreender com clareza os componentes que influenciam os custos operacionais.

Na sequência, foi possível estruturar os custos relevantes do processo, contemplando consumo de combustível, tarifas de pedágio, quilometragem percorrida e demais gastos relacionados à atividade, consolidando uma base de dados confiável para alimentar o modelo. Por fim, o objetivo de desenvolver e aplicar um modelo de otimização de rotas também foi cumprido, permitindo comparar diferentes trajetos e identificar aqueles que apresentaram maior eficiência econômica.

A partir dessa base consolidada, desenvolveu-se um modelo matemático de otimização fundamentado em programação linear, capaz de calcular o custo total de diferentes alternativas de deslocamento e selecionar aquelas com melhor desempenho econômico. A aplicação desse modelo às rotas reais do motorista demonstrou que ajustes simples na escolha dos percursos podem resultar em reduções significativas nos custos totais do transporte.

A comparação entre os custos reais e os custos estimados pelo modelo permitiu validar sua consistência e aplicabilidade. Os resultados evidenciaram que o modelo representa adequadamente os custos operacionais, oferecendo previsibilidade financeira, clareza sobre a composição das despesas e suporte estruturado para a tomada de decisões. Antes deste estudo, o motorista considerava apenas combustível e pedágios em suas estimativas; assim, o modelo desenvolvido ampliou significativamente sua compreensão sobre os gastos reais da operação, reforçando sua utilidade prática.

Diante desses resultados, é possível afirmar que o trabalho responde ao problema de pesquisa ao demonstrar como um modelo de otimização de rotas pode apoiar a tomada de decisão e contribuir para a redução dos custos operacionais. A ferramenta proposta se mostra eficaz ao fornecer uma estrutura metodológica capaz de ampliar o entendimento sobre os custos do transporte rodoviário e orientar escolhas mais eficientes economicamente.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se expandir o modelo por meio da inclusão de novos parâmetros, como desgaste de pneus, manutenção preventiva, tempo de viagem e condições das vias, tornando-o ainda mais completo e robusto. Também se sugere a integração do modelo a plataformas digitais ou aplicativos móveis, facilitando sua utilização contínua e a atualização automática das variáveis de custo. Ademais, futuras pesquisas podem aplicar a metodologia a diferentes perfis de motoristas ou pequenas empresas de transporte, permitindo avaliações comparativas e a validação do modelo em contextos mais amplos.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Felipe Alves de. **Aplicação de métodos de roteirização de rotas para minimização de custos em uma empresa de distribuição de equipamentos de tecnologia no Rio Grande do Norte**. Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, Rio Grande do Norte. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/1ff73142-09a4-4762-8f2e-203b0459055c>. Acesso em: 27 maio 2025.

ALMEIDA, Matheus das Neves; DOS SANTOS NETO, Belchior Rodrigues; DE MOURA FILHO, Agnelo Matos; DOS SANTOS, Arnaldo Alves. OTIMIZAÇÃO DA ROTA DE VEÍCULOS E SEUS IMPACTOS NA LOGÍSTICA DE DISTRIBUIÇÃO: UM ESTUDO DE CASO EM UMA DISTRIBUIDORA DE PRODUTOS DE LIMPEZA. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia de Produção**, Florianópolis, v. 20, n. 2, p. 598-626, out. 2020. Disponível em: <https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/3356/1926>. Acesso em: 19 maio 2025.

ARRUDA, José Micael Rodrigues de. **A importância da logística 4.0 para as empresas na realidade atual: um referencial teórico**. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 7., 2019. Anais [...]. Montes Claros - MG: Faculdade Santo Agostinho - FASA, 2019. ISSN: 2318-9258. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/32001>. Acesso em: 30 maio 2025.

AZEVEDO, Maria Inês Oliveira. **Modelo de otimização e gestão de custos numa empresa de transporte de mercadorias**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial na Universidade do Minho. Braga, Portugal. 2021. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/81420>. Acesso em: 01 jun. 2025.

BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. São Paulo: Edições 70, 2016. Disponível em: <https://madmunifacs.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/08/anc3a1lise-de-contec3bado-laurence-bardin.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.

BARROS, Jofre; CUNHA, Fernanda. **Aplicação de algoritmos heurísticos na otimização de rotas comerciais em tempo real**. In: II Workshop Brasileiro de Cidades Inteligentes. Sociedade Brasileira de Computação - SBC, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5753/wbci.2019.6743>. Acesso em: 4 jun. 2025.

BIRELO, Henrique Vigilato. Potencial transformador da inteligência artificial na logística. **Revista FT**, v. 29, n. 140. 2024. Disponível em:

<https://revistaft.com.br/potencial-transformador-da-inteligencia-artificial-na-logistica/>. Acesso em: 1 jun. 2025.

BOWERSOX, Donald J.; CLOSS, David J.; COOPER, M. Bixby; BOWERSOX, John C. **Gestão logística da cadeia de suprimentos**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=cli2AAwAAQBAJ>. Acesso em: 24 maio 2025.

CARVALHO, Eriane Fialho de; RIBEIRO, Rosinei Batista. **ESTUDO DA LOGÍSTICA URBANA CITY LOGISTICS: ENFOQUE NA MOBILIDADE DE CARGAS DO MUNICÍPIO DE LORENA - SP**. In: 31º SEMINÁRIO DE LOGÍSTICA, 2012, Rio de Janeiro. 31º Seminário de Logística. São Paulo: Editora Blucher, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/2594-360x-22249>. Acesso em: 1 jun. 2025.

CATIANO, Antônio Ricardo; PEREIRA, Agnaldo. **Contabilidade de custos e industrial**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018. 184 p. Disponível em: https://s3.amazonaws.com/cm-kl-content/LIVROS_UNOPAR_AEDU/Contabilidade%20de%20Custos%20e%20Industrial.pdf. Acesso em: 10 jun. 2025.

CAVALCANTE, Jéssica Pereira; MARCOS, Eduardo Lima. **Gestão de transporte: desafios e oportunidades no contexto da sustentabilidade atual**. In: Anais do Congresso Brasileiro de Logística, 2021. Disponível em: <https://fateclog.com.br/anais/2021/parte4/476-596-1-RV.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2025.

CORRÊA, Jobel Santos; SAMPAIO, Mauro; BARROS, Rodrigo de Castro. Um estudo exploratório sobre tecnologias emergentes aplicadas à logística 4.0. **Gestão & Produção**, v. 27, n. 3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-530X5468-20>. Acesso em: 2 jun. 2025.

DE AZEVEDO, Brunelli Alves; ALVES, Marcos Antonio; CASTRO E ALVES, Tatiane Katheryne; DE BRITO, Kátia Lopes; REAL, Luiza Bernardes. **Otimização do custo de transporte por meio da aplicação de programação linear**: um estudo de caso em uma transportadora de gás liquefeito de petróleo (GLP) em Betim/MG. In: 13º Congresso de Gerenciamento de Projetos do PMI-MG. 28 e 29 de Setembro de 2018. Minas Gerais, MG: Evento Científico. 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/336614413>. Acesso em: 4 jun. 2025

DUTRA, Ana Luísa Luiz. **Otimização do processo logístico de transporte**: estudo de caso em uma indústria de alimentos. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, GO: PUC GOIÁS. 2023. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/6064>. Acesso em: 4 jun. 2025.

EPL - Empresa de Planejamento e Logística S.A. **Relatório Executivo do PNL 2025**, junho de 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/PIT/politica-e-planejamento/publicacoes/pnl2025.pdf>. Acesso em 26 maio de 2025.

FUNK, Tiago; FIORESE, Adriano; BALDO, Fabiano. **Otimização de rotas logísticas por meio da abordagem *Team Orienteering Problem* baseada em metaheurística GRASP e *Path Relinking***. In: Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional. SBIC, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21528/cbic2021-166>. Acesso em: 4 jun. 2025.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa** -. 6. ed. Rio de Janeiro: Atlas Ltda, 2017. 300 p. Produção digital: Ozone. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788597012934/epubcfi/6/10>

GOMES, Guilherme Wataru. **Logística Lean 4.0: análise das barreiras de implementação através da metodologia DEMATEL em empresas de transformação**. Dissertação de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/252418>. Acesso em: 02 jun. 2025.

GONÇALVES, Ricardo Figueira; SILVA, Ricardo. Impactos ambientais do transporte de carga rodoviário no Brasil: um estudo do ciclo de vida. **Produção**, v. 22, n. 5, p. 1039-1050, 2012. DOI: 10.1590/S0103-65132012005000046.

GUERRERO GODOY, Susana del Rocío; VILLAMARIN PADILLA, Jenny Margoth; PADILLA MUÑOZ, Monserrat Amparo. **Emprendimientos y modelos matemáticos de transporte y logística en la ciudad de Riobamba**. Conciencia Digital, v. 3, n. 3, p. 313-331, 21 jul. 2020. ISSN: 2600-5859. Disponível em: <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v3i3.1318>. Acesso em: 4 jun. 2025.

JIMENEZ-FRANCO, Maryely Andrea; GASPARETTO, Valdirene. Práticas para a gestão de custos logísticos em empresas industriais de grande porte da Colômbia. **Revista Científica General José María Córdova**, v. 18, n. 3, p. 364-383, 2020. ISSN 0123-5923. Disponível em: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-59232020000300364. Acesso em: 03 jun. 2025.

LEÃO, Lourdes Meireles. **Metodologia do estudo e pesquisa**. Livro digital. Petrópolis: Editora Vozes, 2019. 136 p. ISBN 9788532662255. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Metodologia_do_estudo_e_pesquisa/R92iDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1. Acesso em: 10 jun. 2025.

LEITE Junior, Mauro; JUNIOR, Souza Marco Antonio Alves de. Elaboração de práticas de gestão de custos e precificação de fretes para pequenos transportadores rodoviários de carga. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 2, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.31510/infa.v16i2.628>. Acesso em: 04 jun. 2025.

LIMA, Marcus Ayrton Rocha de; FERNANDES, Douglas; OLIVA, Flavio Alberto. A utilização da pesquisa operacional para resolver problema de logística em transporte rodoviário de cargas. **Colloquium Exactarum**, v. 10, n. 1, p. 1-8, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.18046/j.estger.2020.156.3754>. Acesso em: 3 jun. 2025.

LONGARAY, André A. **Introdução à Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Saraiva, 2013. E-book. p.8. ISBN 9788502210844. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788502210844/>. Acesso em: 17 nov. 2025.

LOPES, Carine Almeida; VEIGA, Kaio Henrique; PEREIRA, Raissa Soares dos Santos. **Otimização de rotas e frotas com inteligência artificial na logística: avanços, desafios e perspectivas futuras**. Trabalho de Conclusão de Curso em Tecnologia em Gestão da Tecnologia da Informação. 2024. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/21527>. Acesso em: 4 jun. 2025.

LOZADA, Gisele; NUNES, Karina da Silva. **Metodologia Científica**. Porto Alegre: Sagah Educação S.A., 2018. 238 p. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595029576/pageid/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

LUCCHESI, Claudio. **O gerenciamento de estoques e logística**. [S.l.]: [s.n.], 2024. Publicado em 6 set. 2024. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/O_GERENCIAMENTO_DE_ESTOQUES_E_LOG%3%8DSTICA/PKkfEQAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=otimiza%C3%A7%C3%A3o%20de%20rotas%20para%20reduzir%20custos&pg=PA55&printsec=frontcover. Acesso em: 26 maio 2025.

LUIZ, Ana Karolina; WERNKE, Rodney; JUNGES, Ivone; RUFATTO, Ivanir. Benefícios da análise custo/volume/lucro em agenciadora de transporte de cargas. **Revista Produção Industrial & Serviços**, v. 4, n. 2, p. 33-49, 2018. Disponível em: https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/rev_prod/article/view/52376/pdf. Acesso em: 04 jun. 2025.

MARCONI, Marina de A.; LAKATOS, Eva M. **Metodologia Científica**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2022. E-book. ISBN 9786559770670. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786559770670/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

MARTON, Fabio; PEREZ, Gilberto; FERREIRA, André Lozano. **O uso da inteligência artificial na gestão de riscos físicos no transporte rodoviário de cargas. Práticas em Contabilidade e Gestão**, São Paulo, v. 12, n. 4, 29 nov. 2024. Disponível em: <https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/pcg/article/view/17492/12654>. Acesso em: 10 jun. 2025

MATOS, Milene Andreia de Araujo; BASSAN, H. Gestão de custos: um estudo no transporte rodoviário de cargas de uma empresa na cidade de Sinop-MT. **Revista Contabilidade & Amazônia**, v. 1, n. 1, p. 85-110, 2021. Disponível em: <https://periodicos.unemat.br/index.php/rca/article/view/6700>. Acesso em: 04 jun. 2025.

MORAIS, Marcos de Oliveira; MORAIS, Gabriel Alves. Os impactos da Indústria 4.0 e da Inteligência Artificial nas atividades logísticas empresariais. **Revista FSA**, v. 21, n. 1, p. 134-149, 1 jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.12819/2024.21.1.8>. Acesso em: 3 jun. 2025.

NASCIMENTO, Ângela Maria; BATTAGLIN, Cledinei Rodrigo; BOHRER, Elenora da Cruz; ASLAN, Helena; COURA, Lilia Rodrigues; BARBOSA, Luiz Henrique; CÉ, Sanderlei. **Otimização da logística de transporte rodoviário de contêineres na ID Cargo Brasil LTDA**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão do Negócio) - Fundação Dom Cabral; Instituto de Transporte e Logística, Porto Alegre, 65 f. 2022. Disponível em: <https://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/568>. Acesso em: 4 jun. 2025.

OKADA, Fernanda Eri. **Estudo sobre a lucratividade dos caminhoneiros autônomos no transporte de cargas agrícolas**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2019. Trabalho de Iniciação Científica – Departamento de Economia, Sociologia e Administração, Grupo ESALQ-LOG. Disponível em: <https://esalqlog.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/2020/Inicia%C3%A7%C3%A3o%20Cient%C3%ADfica/OKADA,%20F.%20E.%20Estudo%20sobre%20a%20lucratividade%20dos%20caminhoneiros%20aut%C3%B4nomos%20no%20transporte%20de%20cargas%20agr%C3%ADcolas.pdf>. Acesso em: 26 maio 2025.

PAULINO, Caio Ferracina Rodrigues; AMARAL, Denise Rodrigues; PRATES, Edna Silva Santos; MAÇÃS, Kelly Regina Martins; ALMEIDA, Sarita Magnan Antonio. **Modelo de atração e retenção das novas gerações no setor de transporte rodoviário de cargas**. São Paulo, 2023. Disponível em: <http://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/650>. Acesso em: 26 maio 2025.

PEREIRA, Marcelo Alves. **Desafios da Logística 4.0**. Artigo apresentado no Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR: Programa

de Especialização em Engenharia de Produção. 19f. 2019. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/bitstream/handle/1884/70360/R%20-%20E%20-%20MARCELO%20ALVES%20PEREIRA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 04 jun. 2025.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 3. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2021. Disponível em: <https://www.feevale.br/Comum/midias/0163c988-1f5d-496f-b118-a6e009a7a2f9/E-book%20Metodologia%20do%20Trabalho%20Cientifico.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.

RANGEL LOGISTICS SOLUTIONS. **Logística em 2025: tendências e inovações tecnológicas** - Blog. 2024. Disponível em: <https://www.rangel.com/pt/blog/logistica-em-2025-tendencias-e-inovacoes-tecnologicas/>. Acesso em: 5 jun. 2025.

RODRIGUES, Nayra Vasiulis Ferreira. **Logística 4.0 e sustentabilidade: análise das práticas, benefícios e desafios em prestadores de serviços logísticos**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração na Universidade Federal de São Carlos. 176 f. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/server/api/core/bitstreams/dd1868a8-852e-4420-8eaf-d739dd17104f/content>. Acesso em: 03 jun. 2025.

RODRIGUES, Nayra Vasiulis Ferreira; FIORINI, Paula de Camargo. **Contribuições da Logística 4.0 para a Sustentabilidade Corporativa: revisão sistemática da literatura**. In: XXIV SEMEAD (Seminários em Administração), Novembro, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/370976841>. Acesso em: 3 jun. 2025.

RODRIGUES, Rodrigo. **Pesquisa operacional**. Porto Alegre: SAGAH, 2017. E-book. p.78. ISBN 9788595020054. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595020054/>. Acesso em: 17 nov. 2025.

ROSA, Adriano Carlos Moraes; DE ALMEIDA, Fabio Augusto Saletti; DOS SANTOS, Doroteia Soares; DE MORAES, José Geraldo; NETO, Sergio Tenorio dos Santos. **Indústria 4.0 e Logística 4.0: inovação, integração, soluções e benefícios reais decorrentes do mundo virtual**. In: X FATECLOG, 2019, Guarulhos. Anais [...]. Guarulhos: FATEC, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/345342203_INDUSTRIA_40_e_LOGISTICA_40_inovacao_integracao_solucoes_e_beneficios_reais_decorrentes_do_mundo_virtual. Acesso em: 3 jun. 2025.

ROSCOE, Juliana Sarti. **A internalização de variáveis ambientais nas análises custo-benefício para projetos rodoviários: utopia ou realidade?** Dissertação de

Mestrado em Gestão Econômica do Meio Ambiente, Universidade de Brasília, DF. 126 f. 2014. Disponível em: <https://www.academia.edu/7990954>. Acesso em: 4 jun. 2025.

SÁ, Lauro Chagas e; ARPINI, Bianca Passos; SANTOS, Paulo Henrique dos (Orgs.). **Pesquisa operacional no campo da logística: explorando interfaces**. Vitória: Edifes, 2019. ISBN: 9788582633199 (e-book). Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/791>. Acesso em: 4 jun. 2025.

SANTOS, Roberto Vatan dos. **Custos operacionais e formação de preço de frete no transporte rodoviário de cargas: um estudo de caso**. In: Anais do Congresso Brasileiro de Custos - ABC, 2014. Disponível em: <https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/1429>. Acesso em: 04 jun. 2025.

SENNE, Clara Moreira; LIMA, Josiane de Palma. **Iniciativas para a sustentabilidade do transporte e logística urbana: uma revisão da literatura**. In: PLURIS 2020 – 9º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável, 2020, Águas de Lindóia. Anais [...]. Águas de Lindóia: UNESP, 2020. Disponível em: [_https://pluris2020.faac.unesp.br/Paper792.pdf](https://pluris2020.faac.unesp.br/Paper792.pdf). Acesso em: 3 jun. 2025.

SILVA, Adriano Maniçoba da. **Pesquisa operacional aplicada à logística**. Rio de Janeiro: Editora Alta Books, 2023. E-book. p.221. ISBN 9788550818634. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788550818634/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SILVA, Eduardo Filipe da; KAWAKAME, Marcelo dos Santos. **Logística 4.0: desafios e inovações**. In: IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Anais [...]. Ponta Grossa, PR: ConBRepro. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356998067_Logistica_40_Desafios_e_inovacoes_Logistic_40_Challenges_and_innovations. Acesso em: 03 jun. 2025.

SIMÃO, Luiz Eduardo; SCARIOT, Géssica Luiza; CEZNE, Marcos Antonio. Transporte rodoviário de cargas. **Revista Eletrônica de Estratégia & Negócios**, v. 15, p. 97-122, 29 jul. 2022. Disponível em: [_https://doi.org/10.59306/reen.v15e202297-122](https://doi.org/10.59306/reen.v15e202297-122). Acesso em: 4 jun. 2025.

SOARES, Sara Crislei de Souza. **Otimização de rotas como uma ferramenta para redução de custos e emissões no transporte de resíduos: um estudo de caso da cidade de Sapucaia, RJ**. Dissertação de Mestrado em Modelagem Computacional. Universidade Federal de Juiz de Fora. 84 f. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/17844>. Acesso em: 4 jun. 2025.

SOUSA, Diogo Sousa de; SILVA, Cláudio Henrique Fonseca da; FRAZÃO, Fabiana Frazão. Técnicas e metodologias para otimização de rotas no transporte rodoviário de

cargas: uma revisão sistemática. *In*: SOUSA, Diogo Sousa de; SILVA, Cláudio Henrique Fonseca da; FRAZÃO, Fabiana Frazão. **Engenharias: produtividade e inovação tecnológica**. [S. l.]: Atena Editora, 2024. p. 1-8. ISBN 9786525827933. Disponível em: <https://doi.org/10.22533/at.ed.933112427092>. Acesso em: 4 jun. 2025.

SOUZA, Daniel Antonio de. Sistema de Logística Integrado: Uma Revisão da Literatura. **Revista de Psicologia**, v. 15, n. 55, p. 1148-1163, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/online.v15i55.3035>. Acesso em: 3 jun. 2025.

VERGARA, Sylvia Constant. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 17. ed. São Paulo: Atlas, 2020. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/558948603/VERGARA-Projetos-e-Relatorios-de-Pesquisa-Em-Administracao>. Acesso em: 10 jul. 2025.

APÊNDICE A - CUSTOS OPERACIONAIS

DE	PAR A	DISTÂNCIA (KM)	COMBUSTÍVEL	PEDÁGIO	MANUTENÇÃO	FINANCIAMENTO	DEPRECIAÇÃO	DESPESAS ADMINISTRATIVAS	ALIMENTAÇÃO	TEMPO OCIOSO	IMPREVISTOS	CUSTO TOTAL
1	2	14,4	R\$ 29,51		R\$ 36,28	R\$ 3,06	R\$ 1,41	R\$ 0,31	R\$ 1,72	R\$ 1,33	R\$ 0,63	R\$ 74,25
2	3	17,2	R\$ 35,25		R\$ 43,34	R\$ 3,66	R\$ 1,68	R\$ 0,37	R\$ 2,05	R\$ 1,59	R\$ 0,75	R\$ 88,69
3	4	21,4	R\$ 43,86		R\$ 53,92	R\$ 4,55	R\$ 2,09	R\$ 0,46	R\$ 2,56	R\$ 1,97	R\$ 0,93	R\$ 110,34
4	5	12,5	R\$ 25,62		R\$ 31,50	R\$ 2,66	R\$ 1,22	R\$ 0,27	R\$ 1,49	R\$ 1,15	R\$ 0,54	R\$ 64,45
4	6	28,2	R\$ 57,79		R\$ 71,06	R\$ 6,00	R\$ 2,75	R\$ 0,61	R\$ 3,37	R\$ 2,60	R\$ 1,22	R\$ 145,41
5	7	58,2	R\$ 119,27		R\$ 146,65	R\$ 12,38	R\$ 5,69	R\$ 1,26	R\$ 6,95	R\$ 5,37	R\$ 2,53	R\$ 300,09
6	8	72,6	R\$ 148,79		R\$ 182,93	R\$ 15,44	R\$ 7,09	R\$ 1,58	R\$ 8,67	R\$ 6,70	R\$ 3,15	R\$ 374,34
7	9	40,7	R\$ 83,41		R\$ 102,55	R\$ 8,65	R\$ 3,98	R\$ 0,88	R\$ 4,86	R\$ 3,76	R\$ 1,77	R\$ 209,86
7	11	96,2	R\$ 197,15		R\$ 242,40	R\$ 20,46	R\$ 9,40	R\$ 2,09	R\$ 11,49	R\$ 8,88	R\$ 4,18	R\$ 496,03
8	10	38,9	R\$ 79,72		R\$ 98,02	R\$ 8,27	R\$ 3,80	R\$ 0,84	R\$ 4,64	R\$ 3,59	R\$ 1,69	R\$ 200,58
8	14	49,9	R\$ 102,26		R\$ 125,74	R\$ 10,61	R\$ 4,87	R\$ 1,08	R\$ 5,96	R\$ 4,60	R\$ 2,17	R\$ 257,30
9	13	13	R\$ 26,64		R\$ 32,76	R\$ 2,76	R\$ 1,27	R\$ 0,28	R\$ 1,55	R\$ 1,20	R\$ 0,56	R\$ 67,03

10	15	22,4	R\$ 45,91	R\$ 56,44	R\$ 4,76	R\$ 2,19	R\$ 0,49	R\$ 2,67	R\$ 2,07	R\$ 0,97	R\$ 115,50
11	12	13,4	R\$ 27,46	R\$ 33,76	R\$ 2,85	R\$ 1,31	R\$ 0,29	R\$ 1,60	R\$ 1,24	R\$ 0,58	R\$ 69,09
12	16	45,8	R\$ 93,86	R\$ 115,40	R\$ 9,74	R\$ 4,47	R\$ 0,99	R\$ 5,47	R\$ 4,23	R\$ 1,99	R\$ 236,16
13	14	45,4	R\$ 93,04	R\$ 114,40	R\$ 9,65	R\$ 4,44	R\$ 0,99	R\$ 5,42	R\$ 4,19	R\$ 1,97	R\$ 234,09
14	17	70,4	R\$ 144,28	R\$ 177,39	R\$ 14,97	R\$ 6,88	R\$ 1,53	R\$ 8,41	R\$ 6,50	R\$ 3,06	R\$ 363,00
15	18	128,8	R\$ 263,96	R\$ 324,54	R\$ 27,39	R\$ 12,58	R\$ 2,80	R\$ 15,38	R\$ 11,88	R\$ 5,59	R\$ 664,12
16	19	43,9	R\$ 89,97	R\$ 110,62	R\$ 9,33	R\$ 4,29	R\$ 0,95	R\$ 5,24	R\$ 4,05	R\$ 1,91	R\$ 382,56
17	20	62,1	R\$ 127,27	R\$ 156,48	R\$ 13,20	R\$ 6,07	R\$ 1,35	R\$ 7,41	R\$ 5,73	R\$ 2,70	R\$ 320,20
18	21	68,3	R\$ 139,97	R\$ 172,10	R\$ 14,52	R\$ 6,67	R\$ 1,48	R\$ 8,15	R\$ 6,30	R\$ 2,97	R\$ 352,17
19	22	33,8	R\$ 69,27	R\$ 85,17	R\$ 7,19	R\$ 3,30	R\$ 0,73	R\$ 4,04	R\$ 3,12	R\$ 1,47	R\$ 174,28
20	25	63,3	R\$ 129,73	R\$ 159,50	R\$ 13,46	R\$ 6,18	R\$ 1,37	R\$ 7,56	R\$ 5,84	R\$ 2,75	R\$ 326,39
21	20	92,2	R\$ 188,95	R\$ 232,32	R\$ 19,61	R\$ 9,01	R\$ 2,00	R\$ 11,01	R\$ 8,51	R\$ 4,00	R\$ 475,41
22	23	83,5	R\$ 171,12	R\$ 210,40	R\$ 17,76	R\$ 8,16	R\$ 1,81	R\$ 9,97	R\$ 7,70	R\$ 3,63	R\$ 586,75
22	24	39,7	R\$ 81,36	R\$ 100,03	R\$ 8,44	R\$ 3,88	R\$ 0,86	R\$ 4,74	R\$ 3,66	R\$ 1,72	R\$ 204,70

23	26	23,1	R\$ 47,34	R\$ 58,21	R\$ 4,91	R\$ 2,26	R\$ 0,50	R\$ 2,76	R\$ 2,13	R\$ 1,00	R\$ 119,11
24	27	98,7	R\$ 202,27	R\$ 248,70	R\$ 20,99	R\$ 9,64	R\$ 2,14	R\$ 11,78	R\$ 9,11	R\$ 4,29	R\$ 508,92
25	28	42,6	R\$ 87,30	R\$ 107,34	R\$ 9,06	R\$ 4,16	R\$ 0,92	R\$ 5,09	R\$ 3,93	R\$ 1,85	R\$ 219,66
26	29	5,1	R\$ 10,45	R\$ 12,85	R\$ 1,08	R\$ 0,50	R\$ 0,11	R\$ 0,61	R\$ 0,47	R\$ 0,22	R\$ 26,30
27	30	32,3	R\$ 66,20	R\$ 81,39	R\$ 6,87	R\$ 3,16	R\$ 0,70	R\$ 3,86	R\$ 2,98	R\$ 1,40	R\$ 166,55
28	31	62,5	R\$ 128,09	R\$ 157,48	R\$ 13,29	R\$ 6,11	R\$ 1,36	R\$ 7,46	R\$ 5,77	R\$ 2,71	R\$ 322,27
29	32	97,1	R\$ 199,00	R\$ 244,67	R\$ 20,65	R\$ 9,49	R\$ 2,11	R\$ 11,59	R\$ 8,96	R\$ 4,22	R\$ 633,87
30	33	24,6	R\$ 50,41	R\$ 61,99	R\$ 5,23	R\$ 2,40	R\$ 0,53	R\$ 2,94	R\$ 2,27	R\$ 1,07	R\$ 126,84
31	34	84,8	R\$ 173,79	R\$ 213,67	R\$ 18,03	R\$ 8,28	R\$ 1,84	R\$ 10,13	R\$ 7,82	R\$ 3,68	R\$ 437,25
32	35	19	R\$ 38,94	R\$ 47,88	R\$ 4,04	R\$ 1,86	R\$ 0,41	R\$ 2,27	R\$ 1,75	R\$ 0,82	R\$ 254,17
33	36	48	R\$ 98,37	R\$ 120,95	R\$ 10,21	R\$ 4,69	R\$ 1,04	R\$ 5,73	R\$ 4,43	R\$ 2,08	R\$ 247,50
34	40	56,3	R\$ 115,38	R\$ 141,86	R\$ 11,97	R\$ 5,50	R\$ 1,22	R\$ 6,72	R\$ 5,19	R\$ 2,44	R\$ 446,50
35	37	130,7	R\$ 267,85	R\$ 329,33	R\$ 27,79	R\$ 12,77	R\$ 2,84	R\$ 15,61	R\$ 12,06	R\$ 5,67	R\$ 673,92

36	34	126,3	R\$ 258,84		R\$ 318,24	R\$ 26,86	R\$ 12,34	R\$ 2,74	R\$ 15,08	R\$ 11,65	R\$ 5,48	R\$ 651,23
37	38	31	R\$ 63,53	R\$ 156,20	R\$ 78,11	R\$ 6,59	R\$ 3,03	R\$ 0,67	R\$ 3,70	R\$ 2,86	R\$ 1,35	R\$ 316,04
38	39	45,2	R\$ 92,63	R\$ 156,20	R\$ 113,89	R\$ 9,61	R\$ 4,42	R\$ 0,98	R\$ 5,40	R\$ 4,17	R\$ 1,96	R\$ 389,26
39	40	49,8	R\$ 102,06	R\$ 156,20	R\$ 125,48	R\$ 10,59	R\$ 4,86	R\$ 1,08	R\$ 5,95	R\$ 4,59	R\$ 2,16	R\$ 412,98
40	41	93,4	R\$ 191,41	R\$ 156,20	R\$ 235,34	R\$ 19,86	R\$ 9,12	R\$ 2,03	R\$ 11,15	R\$ 8,62	R\$ 4,06	R\$ 637,79

Fonte: A autora (2025).

APÊNDICE B - DEFINIÇÃO DO FLUXO LÍQUIDO DE CADA NÓ

NÓ	FLUXO LÍQUIDO	OFERTA DEMANDA
1	-1	-1
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0
25	0	0
26	0	0
27	0	0
28	0	0
29	0	0
30	0	0
31	0	0
32	0	0
33	0	0
34	0	0
35	0	0
36	0	0
37	0	0
38	0	0
39	0	0
40	0	0
41	1	1

Fonte: A autora (2025).