

FALSEAMENTO DA HIPÓTESE DE ESCOLHA ÓTIMA NA ROTEIRIZAÇÃO DE CARGAS: AVALIAÇÃO DA SELEÇÃO DA MODALIDADE OPERACIONAL DE TRANSPORTE PELO ANALISTA DE ROTEIRIZAÇÃO

Jefferson Mota dos Santos

Pós-graduado em Logística e Operações

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP

Email: jefferson.santos71@fatec.sp.gov.br

Prof. Dr. Regis Cortez Bueno

Professor e Pesquisador - Coordenadoria de Pesquisa, Inovação e Pós-graduação

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP

Email:regiscb@ifsp.edu.br

Resumo

A roteirização de cargas influencia diretamente os custos logísticos e a eficiência operacional. Entretanto, a escolha entre Frota Própria, Frota Agregada ou Cross-Docking ainda é frequentemente realizada de forma manual pelo analista, sem comparação técnica entre as alternativas. Este estudo desenvolveu um sistema capaz de calcular o custo técnico mínimo de cada rota e confrontá-lo com o custo praticado pela escolha do analista. Os resultados evidenciaram divergência sistemática entre a escolha manual do analista e a alternativa de menor custo, resultando em perdas financeiras recorrentes. A análise estatística demonstrou que essa diferença não é aleatória, configurando um padrão de ineficiência operacional. Conclui-se que a ausência de apoio analítico compromete a eficiência econômica, reforçando a necessidade de padronização e suporte à decisão na roteirização de cargas.

Palavras-chave: Roteirização; Modalidades; Logística; Otimização; Rotas.

Abstract

Freight routing directly affects logistics costs and operational efficiency. However, the choice among Own Fleet, Hired Fleet, or Cross-Docking is often made manually by routing analysts, without structured cost comparison. This study developed a system capable of determining the technical minimum cost for each route and comparing it with the cost applied in practice. The results revealed a systematic divergence between manual selection and the lowest-cost alternative, leading to recurring financial losses. Statistical analysis confirmed that this difference is not random, but a consistent pattern of inefficiency. It is concluded that the lack of analytical support compromises economic performance, reinforcing the need for standardized and data-driven decision-making in freight routing.

Keywords: Routing; Modalities; Logistics; Optimization; Routes.

1. Introdução

O transporte rodoviário de cargas constitui o principal meio de distribuição no Brasil, desempenhando papel determinante para a coordenação das cadeias de suprimentos e para a disponibilidade de produtos no mercado. Sua predominância decorre da flexibilidade e da capilaridade operacional, porém também representa uma das maiores parcelas do custo logístico das empresas, tornando a eficiência no planejamento de transporte um fator diretamente associado à competitividade organizacional (MOURA & SANTOS, 2018). Nesse contexto, a Roteirização de Cargas (RC) desempenha função estratégica ao definir trajetos, sequências de atendimento e, sobretudo, a modalidade operacional de execução do transporte, que pode envolver Frota Própria (FP), Frota Agregada (FA) ou Operação Cross-Docking (CD).

Embora a literatura apresente modelos matemáticos e heurísticos capazes de estimar o custo técnico mínimo (C_{MIN}) para cada operação, considerando variáveis como distância, capacidade, jornada e pedágio (ABOUSAEIDIA et al., 2016 apud SILVA et al., 2021), observa-se que, no ambiente empresarial, a escolha

da modalidade ainda é frequentemente realizada de forma empírica pelo Analista de Roteirização de Cargas (ARC). Esse processo decisório, baseado em experiência e disponibilidade imediata, pode não convergir para a alternativa economicamente mais eficiente (FERNANDES, 2012).

A ausência de mecanismos de verificação contínua entre o custo escolhido (C_{ESC}) e o custo mínimo disponível favorece a ocorrência de sobrecustos recorrentes, que se acumulam ao longo do tempo e comprometem o desempenho financeiro das operações (TOPAN et al., 2020 apud FERNANDES, 2022). Assim, este estudo busca avaliar se a modalidade operacional escolhida manualmente corresponde ao menor custo possível, comparando decisões práticas a soluções tecnicamente ótimas.

2. Referencial teórico

No Brasil, o transporte rodoviário é predominante na movimentação de cargas e representa parte relevante do custo logístico das empresas. Nessa dinâmica, o planejamento eficiente da operação é determinante para competitividade, especialmente no que se refere à Roteirização de Cargas (RC), que busca organizar entregas considerando distância, tempo e capacidade, visando reduzir custos e otimizar o uso da frota (MOURA & SANTOS, 2018).

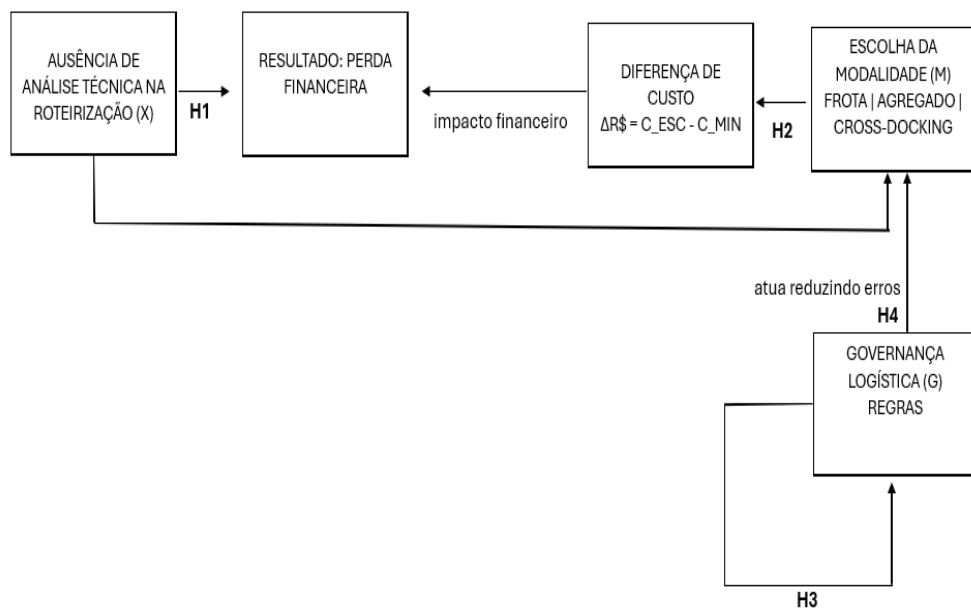
A RC é reconhecida como um problema de otimização combinatória, frequentemente modelado pela Teoria dos Grafos, na qual pontos de entrega são vértices e rotas são arestas, permitindo avaliar diferentes trajetórias possíveis (DIESTEL, 2017). A literatura distingue Problemas de Roteamento em Nós (PRN) e em Arcos (PRA), sendo os primeiros mais comuns em operações de distribuição urbana (WØHLK & LAPORTE, 2018).

A escolha da Modalidade Operacional de Transporte de Cargas (MOTC) — Frota Própria (FP), Frota Agregada (FA) ou Cross-Docking (CD) — representa decisão adicional relevante, pois cada modalidade possui estrutura de custos distinta (ROSA et al., 2010). Para uma mesma rota, essas diferenças podem resultar em custos finais significativamente desiguais, tornando a escolha da modalidade uma decisão econômica estratégica.

Modelos quantitativos têm demonstrado capacidade de identificar o custo técnico mínimo (C_{MIN}) para cada operação, servindo como referência objetiva para validação de decisões práticas (SILVA et al., 2021). No entanto, na rotina operacional, essa escolha ainda é frequentemente realizada de forma empírica pelo Analista de Roteirização, sem auditoria comparativa sistemática.

Diante disso, estudos recentes destacam a necessidade de mecanismos de controle e padronização decisória, como estruturas de Torre de Controle Logística, para reduzir variabilidade e evitar sobrecustos operacionais recorrentes (FERNANDES, 2022). Assim, este estudo parte da hipótese de que, mesmo existindo soluções tecnicamente mais econômicas, a ausência de suporte analítico pode levar a decisões subótimas no processo de roteirização diária.

Figura 1 – Modelo Teórico da Pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3. Método

3.1 Tipo de estudo, local e período

Este é um estudo quantitativo, descritivo-analítico e transversal, conduzido com dados operacionais reais de uma empresa brasileira de distribuição de bens de consumo localizada no estado de São Paulo. O período de observação compreendeu cinco dias úteis consecutivos, 27, 28 e 29 de outubro e 3 e 7 de novembro de 2025, selecionados por representarem um intervalo operacional típico, sem eventos sazonais relevantes (feriados prolongados, campanhas promocionais atípicas ou alterações de malha). A definição desse recorte temporal teve como objetivo garantir homogeneidade do contexto operacional e alta qualidade dos registros, permitindo avaliar o desempenho decisório do Analista de Roteirização em condições padrão de trabalho.

O propósito do estudo foi verificar se a escolha da Modalidade Operacional de Transporte de Cargas (MOTC) feita pelo Analista de Roteirização de Cargas corresponde ao menor custo técnico disponível para cada operação

3.2 Amostra e critérios de seleção

A amostra foi composta por todas as operações de entrega roteirizadas no período definido, totalizando 82 cargas que atendiam simultaneamente aos critérios de: (i) registro completo de quilometragem, peso e modalidade operacional; (ii) cálculo possível dos custos de Frota Própria, Frota Agregada e Cross-Docking; e (iii) ausência de ocorrências excepcionais (cancelamentos, devoluções integrais ou alterações manuais posteriores). Trata-se, portanto, de uma amostragem censitária dentro da janela temporal selecionada, e não de um subconjunto arbitrário de operações.

Para este primeiro estudo, optou-se por um recorte mais restrito com duas justificativas principais: (a) controle de variáveis de confusão, evitando efeitos de sazonalidade, mudanças de demanda ou alterações de política comercial; e (b) viabilidade de auditoria detalhada, permitindo conferência individual das rotas e dos custos calculados. Ainda assim, o número de observações ($n = 82$) é suficiente para aplicação de testes paramétricos, garantindo poder estatístico adequado para

detectar diferenças sistemáticas entre o custo escolhido (C_{ESC}) e o custo mínimo técnico (C_{MIN}).

3.3 Procedimentos de cálculo dos custos

a) Cálculo do Custo da Frota Própria (FP);

O custo total da operação utilizando Frota Própria é dado por:

$$C_{FP} = C_{fixo} + C_{comb} + C_{ped} + C_{MDO} + C_{HE}$$

Onde:

$$C_{comb} = \left(\frac{KM}{km/L}\right) \cdot P_{comb} \quad C_{ped} = (P_{km} \cdot KM) \cdot 2 + (E \cdot \alpha) C_{MDO} = C_{mot} + C_{aj} \quad C_{HE} = \max(0, (H_{total} - H_{jornada}))$$

b) Cálculo do Custo da Frota Agregada (FA);

O custo da Frota Agregada é obtido por interpolação da tabela de frete conforme classe do veículo:

$$C_{FA} = f(KM_{ida}, Classe_{veículo})$$

Quando disponível, substituiu-se o valor tabelado pelo custo registrado manualmente, conforme negociação operacional.

c) Cálculo do Custo da Operação Cross-Docking (CD);

O custo do Cross-Docking foi estimado proporcionalmente ao peso total transportado:

$$C_{CD} = P_{total} \cdot \beta$$

d) Determinação do Custo Mínimo e da Modalidade Escolhida.

$$C_{MIN} = \min(C_{FP}, C_{FA}, C_{CD}) C_{ESC} = \text{custo associado à modalidade selecionada pelo ARC}$$

3.4 Variável principal de avaliação

A variável de interesse é o sobrecurso da decisão humana:

$$\Delta R\$ = C_{ESC} - C_{MIN}$$

3.5 Análise estatística

A hipótese avaliada foi:

$$H_0: \mu_{\Delta R\$} \leq 0 \quad \text{vs.} \quad H_1: \mu_{\Delta R\$} > 0$$

Aplicou-se o teste t pareado unilateral, com nível de significância de 5%, para verificar se a escolha humana apresentou custo maior do que a alternativa de menor custo técnico.

Adicionalmente, calculou-se a taxa de acerto do ARC:

$$ACC = \frac{\Sigma SUCCESS}{N} \cdot 100$$

3.6 Definição das variáveis e siglas utilizadas nas equações

Para a leitura e a replicação dos cálculos, a Tabela 1 apresenta a descrição das siglas e variáveis utilizadas nas equações de custo e de diferença entre o custo escolhido (C_ESC) e o custo mínimo técnico (C_MIN).

Tabela 1 – Descrição das variáveis e siglas utilizadas

| <i>Sigla/ Variável</i> | <i>Descrição</i> |
|----------------------------|------------------|
|----------------------------|------------------|

| | |
|--------------|--|
| C_{FP} | Custo total da Frota Própria para uma operação de entrega |
| C_{FA} | Custo total da Frota Agregada para uma operação de entrega |
| C_{CD} | Custo total da operação em Cross-Docking para uma operação |
| C_{MIN} | Custo mínimo técnico entre as modalidades (FP, FA, CD) para uma mesma operação |
| C_{ESC} | Custo escolhido na prática, de acordo com a modalidade selecionada pelo Analista de Roteirização |
| $\Delta R\$$ | Diferença de custo entre a decisão tomada e o custo mínimo técnico, definida por $\Delta R\$ = C_{ESC} - C_{MIN}$ |
| $\Delta\%$ | Diferença percentual em relação ao custo mínimo técnico, calculada como $\Delta\% = \frac{\Delta R\$}{C_{MIN}} \times 100$ |
| KM_{total} | Quilometragem total percorrida pela operação (ida + volta) |
| KM_{ida} | Quilometragem considerada para a tabela de frete da frota agregada (trajeto de ida) |
| CF_{fixo} | Custo fixo diário da frota própria (depreciação, seguros, impostos etc.) |
| C_{comb} | Custo de combustível da operação (função de KM_{total} e consumo km/L) |
| C_{ped} | Custo total de pedágios na operação |
| C_{MDO} | Custo de mão de obra direta (motorista e ajudante) associado à operação |
| HE | Horas extras de jornada na operação, acima da jornada padrão considerada |
| C_{HE} | Custo adicional de horas extras, calculado a partir de HE e do valor-hora de MDO com acréscimo legal |
| ACC | Acurácia da decisão modal, definida como proporção de operações em que $C_{ESC} = C_{MIN}$ |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.7 Procedimentos analíticos e ferramenta computacional

Para operacionalizar a comparação entre o custo técnico mínimo (C_{MIN}) e o custo escolhido (C_{ESC}), desenvolveu-se um Aplicativo Web Analítico, denominado APP Análise Comparativa das Modalidades, implementado em linguagem Python com interface interativa em Streamlit. O sistema integra funções de cálculo de quilometragem, consumo energético e estrutura de custos modais, permitindo ao usuário reproduzir, auditar e confrontar decisões de roteirização. A ferramenta assegura transparência metodológica, reprodutibilidade dos cálculos e padronização das avaliações operacionais, constituindo-se como instrumento de apoio à tomada de decisão logística.

4. Resultados

Os resultados indicaram que o ARC convergiu para a alternativa de menor custo em apenas uma parcela das decisões, com acurácia média diária em torno de 44,8% ($\pm 12,99\%$).

A diferença entre o custo escolhido e o custo mínimo técnico, expressa por $\Delta R\$ = C_{ESC} - C_{MIN}$, mostrou predominância de valores positivos. A perda média por carga foi de aproximadamente R\$ 418,26, resultando em um sobrecusto acumulado de R\$ 34.297,62 no período (Tabela 2).

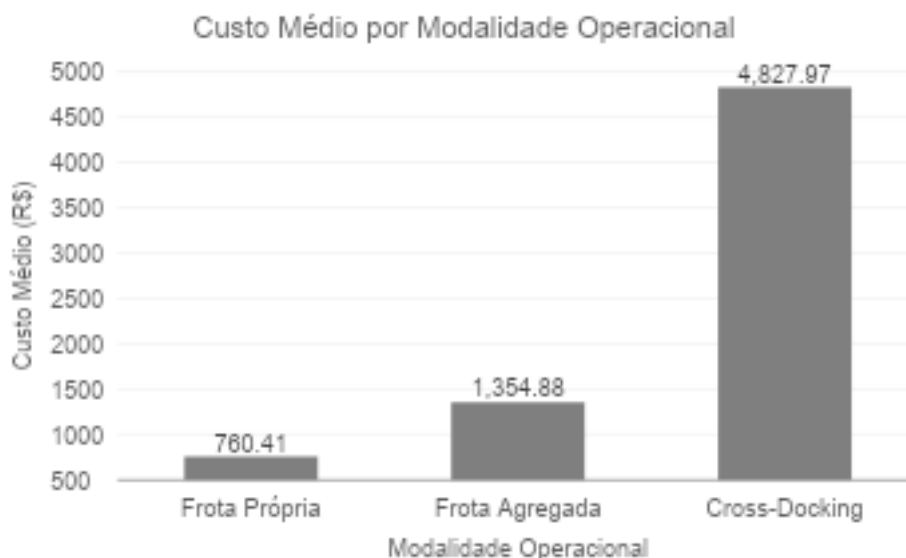
Para verificar se esse sobrecusto poderia ser atribuído ao acaso, aplicou-se um teste t pareado unilateral sobre a média de $\Delta R\$$. O resultado indicou diferença estatisticamente significativa entre o custo escolhido e o custo mínimo ($t = 7,055$; $df = 81$; $p < 0,001$), com intervalo de confiança de 95% entre R\$ 314,25 e R\$ 561,13 e tamanho de efeito forte (Cohen's $d = 0,779$), confirmando que o sobrecusto observado constitui um padrão sistemático de ineficiência econômica na roteirização.

Tabela 2 – Indicadores de acerto modal e perda financeira nos 5 dias analisados

| INDICADOR | VALOR |
|--|------------------|
| NÚMERO TOTAL DE CARGAS AUDITADAS (N) | 82 |
| ACURÁCIA MÉDIA DE ESCOLHA MODAL (MICRO) | 31,70% |
| PERDA FINANCEIRA TOTAL NO PERÍODO (R\$) | 34.297,62 |
| PERDA FINANCEIRA MÉDIA POR CARGA (R\$) | 418,26 |
| PERDA FINANCEIRA MÉDIA RELATIVA (%) | 18,40% |
| TESTE T PAREADO ($\Delta R\$ > 0$) – P-VALOR | < 0,001 |
| TAMANHO DO EFEITO (COHEN'S D) | 0,779 |
| INTERVALO DE CONFIANÇA 95% $\Delta R\$$ (R\$) | [314,25; 561,13] |

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do Google Colab (2025).

Figura 2 – Custo médio por modalidade operacional de transporte



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do MS Excel (2025).

5. Discussão

Os resultados mostraram que a escolha manual da modalidade operacional pelo Analista de Roteirização não converge, na maioria dos casos, para a alternativa de menor custo, indicando ineficiência econômica no processo decisório. Essa divergência revela que a seleção modal tem sido orientada por critérios subjetivos e condicionantes operacionais imediatos, em vez de análise comparativa estruturada entre alternativas. Esse comportamento é consistente com a literatura, que aponta que decisões logísticas sem suporte quantitativo tendem a reproduzir padrões históricos, mesmo quando economicamente desfavoráveis (Moura & Santos, 2018). Assim, a ausência de ferramentas de apoio e mecanismos de auditoria contribui para a manutenção de sobrecustos recorrentes. Os achados reforçam a necessidade de padronização decisória e incorporação de modelos de avaliação técnica na roteirização de cargas.

6. Considerações finais

Este estudo avaliou se a escolha da Modalidade Operacional de Transporte de Cargas realizada manualmente pelo Analista de Roteirização converge para a

alternativa de menor custo técnico. Os resultados indicaram que a seleção manual não condiz, na maior parte das vezes, à alternativa economicamente mais eficiente, resultando em perdas financeiras recorrentes. A análise estatística confirmou que essa diferença não é aleatória, mas sistemática e operacionalmente relevante, evidenciando uma ineficiência estrutural no processo decisório.

Conclui-se que a ausência de suporte analítico na roteirização compromete a eficiência econômica do transporte e favorece a persistência de sobrecustos ao longo do tempo. Assim, torna-se necessária a adoção de ferramentas de apoio à decisão, bem como a implantação de mecanismos de governança, padronização e monitoramento contínuo do processo.

Referências

CORBERÁN, Ángel; PRINS, Christian; LAPORTE, Gilbert. **Arc Routing Problems: Methods and Applications**. *European Journal of Operational Research*, v. 289, n. 2, p. 399–421, 2021.

DIESTEL, Reinhard. **Graph Theory**. 5. ed. Berlin: Springer, 2017.

FERNANDES, Lucas; SILVA, Renata. **Implantação de sistemas de torre de controle como mecanismo de governança logística**. *Revista Gestão Logística e Cadeias Produtivas*, v. 8, n. 1, p. 65–82, 2022.

PEREIRA, João; ALMEIDA, Cíntia; ROCHA, Bruno. **Seleção de modais de transporte na logística de distribuição: uma análise baseada em custos operacionais**. *Revista Brasileira de Gestão e Produção*, v. 27, n. 4, p. 1-15, 2020.

RIBEIRO, Fábio; TELES, Mariana. **Impactos da roteirização manual no desempenho do transporte de carga**. *Journal of Supply Chain and Logistics*, v. 6, n. 2, p. 44-58, 2021.

SANTOS, Júlio; MOURA, Daniel. **Decisão entre frota própria e frota agregada: critérios econômicos e operacionais**. *Revista de Logística e Transportes*, v. 12, n. 3, p. 101-119, 2019.

PANDAS DEVELOPMENT TEAM. pandas: **Python Data Analysis Library. Version 2.0.** 2023. Disponível em: <https://pandas.pydata.org>. Acesso em: 09 nov. 2025.

NUMPY DEVELOPERS. NumPy: **Fundamental package for scientific computing with Python. Version 1.26.** 2023. Disponível em: <https://numpy.org>. Acesso em: 09 nov. 2025.

STREAMLIT INC. Streamlit: **Turn Python Scripts into Web Apps. Version 1.30.** 2023. Disponível em: <https://streamlit.io>. Acesso em: 09 nov. 2025.