

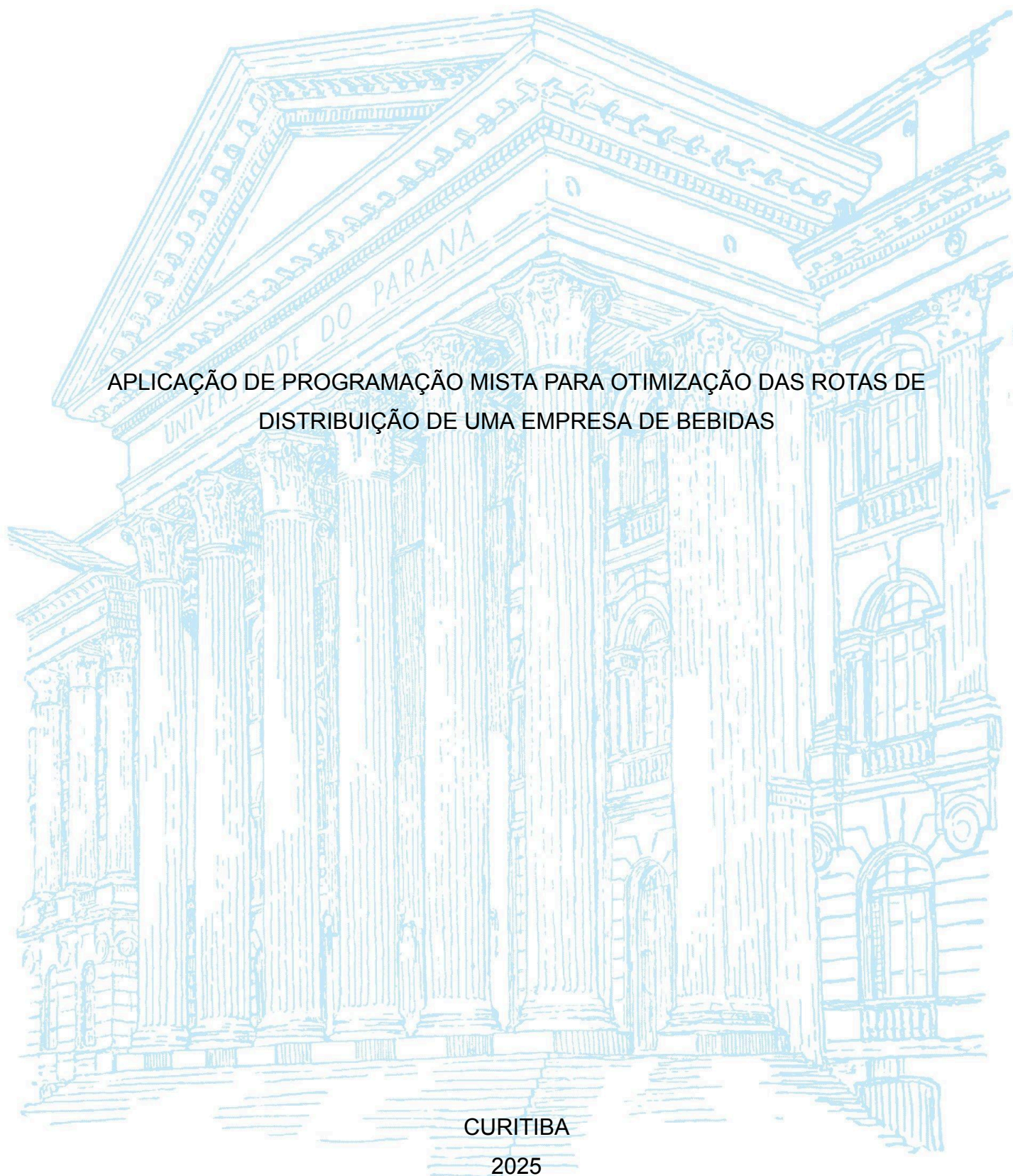
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DANIEL FELIPE PADILHA JORGE

APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO MISTA PARA OTIMIZAÇÃO DAS ROTAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE UMA EMPRESA DE BEBIDAS

CURITIBA

2025



DANIEL FELIPE PADILHA JORGE

APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO MISTA PARA OTIMIZAÇÃO DAS ROTAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE UMA EMPRESA DE BEBIDAS

Artigo apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II como requisito parcial à conclusão do Curso de Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Mariana Kleina

Coorientador: Prof. Alexandre Checoli Choueiri

CURITIBA

2025

APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO MISTA PARA OTIMIZAÇÃO DAS ROTAS DE DISTRIBUIÇÃO DE UMA EMPRESA DE BEBIDAS

Daniel Felipe Padilha Jorge; Mariana Kleina; Alexandre Checoli Choueiri.

RESUMO

A eficiência logística tornou-se um fator crítico para a competitividade das organizações, especialmente em operações que envolvem transporte de alto volume e elevada frequência de entregas. Entre os principais desafios está o desperdício operacional gerado por deslocamentos não produtivos, que ampliam custos e reduzem a utilização da frota. No caso analisado neste estudo, uma empresa brasileira de bebidas apresenta um padrão operacional rígido: os caminhões saem carregados de uma fábrica, realizam a entrega em um centro de distribuição e retornam vazios ao ponto de origem. Essa estrutura linear de rotas, embora simples de executar, resulta em significativo potencial ocioso no trecho de retorno. O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo matemático capaz de identificar trechos adicionais viáveis durante o retorno dos veículos, transformando viagens vazias em deslocamentos produtivos, sem alterar o trecho de ida originalmente planejado. Para isso, propôs-se uma formulação de programação mista inspirada no Problema do Caixeiro Viajante, adaptada às restrições estruturais da operação, como retorno obrigatório à fábrica, proibição de conexões entre centros de distribuição e limitação de tempo máximo da rota considerando um parâmetro α de flexibilidade. Os dados corporativos foram tratados em VBA, consolidados em matrizes de tempos e custos e posteriormente processados em um solver matemático implementado em Python. A análise de 40 pedidos válidos da região Sul mostrou que, no cenário de referência ($\alpha = 0,4$), o modelo gerou rotas produtivas em 21 casos, resultando em economia de R\$ 54.439,13, redução de 288,58 horas totais e acréscimo de 44 entregas produtivas. Os resultados demonstram que o modelo é aplicável, replicável e capaz de melhorar substancialmente a eficiência da frota.

Palavras-chave: programação mista; otimização de rotas; problema do caixeiro viajante; logística; retorno produtivo; transporte de bebidas.

1 INTRODUÇÃO

O setor alimentício enfrenta desafios logísticos intensos, especialmente no que diz respeito à distribuição. A necessidade de planejar rotas eficientes é fundamental para a competitividade, pois uma gestão inadequada do transporte impacta diretamente os custos operacionais e o desempenho do negócio. Dados recentes reforçam essa preocupação: segundo levantamento apresentado na 30ª edição do Fórum Internacional Supply Chain, os gastos logísticos no Brasil atingiram 18,4% do PIB em 2023, o maior patamar desde 2004. Dentro desse montante, o transporte concentrou a maior fatia, representando 9,3% do PIB (ILOS, 2024).

Essa situação evidencia a necessidade de se adotar estratégias que visem reduzir os custos e aumentar a eficiência da cadeia de suprimentos. A otimização de rotas, por exemplo, aparece como uma solução promissora para mitigar perdas e aprimorar o desempenho logístico das empresas, promovendo um melhor equilíbrio entre custos operacionais e níveis de serviço.

Entre as diversas abordagens para otimização de rotas, o Problema do Caixeiro Viajante (*Traveling Salesman Problem* - TSP) se destaca como um modelo teórico fundamental. O TSP propõe encontrar o percurso de menor custo que permita visitar todos os pontos de entrega exatamente uma vez e retornar à origem, constituindo a base para métodos que, posteriormente, são ampliados para lidar com restrições adicionais, como as encontradas no Problema de Roteamento de Veículos (*Vehicle Routing Problem* - VRP) (SOLOMON, 1987).

Historicamente, a importância do TSP nas operações logísticas foi ressaltada desde os primeiros estudos sobre despacho de carga na década de 1950. Dantzig, Fulkerson e Johnson (1954) pioneiramente demonstraram a aplicação de métodos matemáticos na otimização de rotas, o que contribuiu para a consolidação de modelos que hoje sustentam a gestão eficiente do transporte de mercadorias.

Além de sua importância teórica, os conceitos do TSP têm aplicações práticas na otimização logística. Empresas do setor de bebidas, por exemplo, enfrentam desafios operacionais quando precisam planejar diferentes etapas do transporte – o que inclui a organização de sequências de entrega e o atendimento a janelas de tempo restritas – para reduzir os custos e o tempo total das viagens. Essa realidade exige modelos que vão além dos métodos convencionais, proporcionando soluções personalizadas para os problemas de roteirização.

Nos últimos anos, estudos práticos têm demonstrado o potencial da roteirização veicular na melhoria de operações logísticas reais. Um exemplo está no trabalho de pesquisadores que aplicaram algoritmos metaheurísticos ao Problema de Roteamento de Veículos Capacitado com múltiplos depósitos (MDVRP) e demanda estocástica, obtendo resultados expressivos em ambientes industriais com restrições de capacidade e variabilidade de demanda (LIU et al., 2025). Em outra frente, a aplicação de modelos modulares de roteirização permitiu economias entre 9,9% e 32,1% em sistemas de entrega e transporte urbano, evidenciando a eficácia dessa abordagem em diferentes cenários logísticos (RAO; AGARWAL, 2024). Além disso, uma pesquisa desenvolvida para a empresa JingDong, na China, utilizou um método baseado em busca local com estratégias de cadeia para resolver um VRP com múltiplos objetivos, janelas de tempo, coletas e entregas simultâneas, e veículos heterogêneos, demonstrando a aplicabilidade e eficiência do modelo em um problema real de grande escala (DUAN et al., 2025).

Com base nesse contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar um método para a reotimização da malha de distribuição de uma empresa de bebidas brasileira por meio da aplicação de um modelo de programação mista voltado à geração de rotas produtivas no trajeto de retorno da frota fixa (caminhões próprios da empresa). A formulação utiliza o Problema do Caixeiro Viajante como referência teórica, adaptando-o às particularidades da operação por meio de restrições específicas, como o retorno obrigatório à fábrica de origem, a impossibilidade de ligação direta entre centros de distribuição e o limite máximo de tempo permitido para cada rota. Dessa forma, busca-se oferecer uma abordagem prática e aplicável, capaz de reduzir retornos vazios, aumentar a produtividade das viagens e contribuir para a eficiência do processo logístico da empresa.

2 PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

A roteirização de veículos consiste no desafio de planejar rotas de uma frota, partindo de um ou mais depósitos, de forma a atender um conjunto de clientes de maneira eficiente e minimizar o custo total (SOLOMON, 1987). Esse tipo de problema é central na logística e no transporte, onde a definição de rotas adequadas impacta diretamente o desempenho operacional das empresas. Atividades como a distribuição de mercadorias, a entrega de correspondências e a coleta de resíduos dependem de decisões de roteamento que garantam o melhor aproveitamento de recursos e reduzam custos - um fator crucial, considerando que os

gastos logísticos representam uma parcela significativa do total das despesas empresariais (CHOPRA; MEINDL, 2003).

Para responder às demandas crescentes de eficiência e às restrições do ambiente real, a literatura propõe diversas modelagens e variações do problema. Apesar dessa diversidade, todas compartilham uma origem comum: o Problema do Caixeiro Viajante, considerado o ponto de partida para os estudos de roteirização. Essa formulação clássica representa a base teórica sobre a qual foram construídos modelos mais complexos, como aqueles que consideram múltiplos veículos, restrições de capacidade ou janelas de tempo (SOLOMON, 1987).

2.1 PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE

No contexto de roteirização de veículos, o Problema do Caixeiro Viajante surge como uma versão básica e clássica, na qual se busca encontrar o percurso de menor custo que permita visitar todos os pontos da rota exatamente uma vez cada e retornar à origem (SOLOMON, 1987). Este problema fornece a base teórica para muitas das técnicas empregadas na otimização de roteiros, uma vez que possibilita o desenvolvimento inicial de métodos de solução simples que depois são adaptados para lidar com restrições adicionais, como as encontradas no VRP.

Historicamente, o estudo do TSP ganhou relevância já na década de 1960, quando os pesquisadores começaram a aplicar métodos matemáticos para solucionar problemas de percurso ótimo. Dantzig, Fulkerson e Johnson (1954) foram pioneiros ao apresentar uma abordagem baseada em programação linear para solução do problema, inspirando a formulação de diversos outros modelos de roteirização e, conseqüentemente, do *Vehicle Routing Problem*.

A modelagem do TSP é baseada na teoria dos grafos, onde as cidades são representadas por nós e os caminhos entre elas por arestas que carregam valores correspondentes aos custos de deslocamento, como distâncias ou tempos. Essa representação simplificada é fortemente discutida por Goldbarg e Luna (2000), que demonstram como a matemática dos grafos facilita o entendimento e a solução de problemas de percurso.

A modelagem do problema também já foi explorada por diversos autores de formas diferentes, representando a flexibilidade do método. Uma das formulações mais conhecidas foi desenvolvida por Miller, Tucker e Zemlin (1960) e pode ser simplificada como:

Seja $N = \{1, 2, \dots, n\}$ o conjunto de cidades.

Seja c_{ij} o custo (ou distância) entre as cidades i e j .

Seja u_i variável auxiliar usada para eliminar subrotas.

Para cada par (i, j) com $i \neq j$, define-se a variável binária x_{ij} .

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se existe conexão direta de } i \text{ com } j \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Função objetivo: minimizar a soma dos custos das arestas utilizadas nas rotas.

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

Restrições:

$$1) \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i \in N$$

$$2) \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall j \in N$$

$$3) u_i - u_j + n x_{ij} \leq n - 1, \quad \forall 1 \leq i \neq j \leq n$$

$$4) x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j$$

Nesta formulação, as restrições (1) e (2) garantem que cada cidade seja visitada exatamente uma vez, assegurando uma única aresta de entrada e uma de saída para cada vértice. A restrição (3), correspondente ao conjunto Miller–Tucker–Zemlin (MTZ), impede a formação de subtours ao ordenar implicitamente os vértices no percurso. A restrição (4) estabelece a natureza binária das variáveis x_{ij} , indicando se a aresta é utilizada ou não na solução (MILLER et al., 1960).

Embora essa modelagem permita identificar o percurso ótimo, o TSP apresenta desafios importantes devido à sua alta complexidade computacional. O problema é

classificado como NP-difícil, implicando que, com o aumento do número de cidades, o tempo computacional necessário para encontrar a solução ótima cresce exponencialmente (GAREY; JOHNSON, 1979). Ou seja, com o aumento do número de cidades, os métodos exatos tornam-se inviáveis devido à explosão combinatória, o que impulsionou a adoção de heurísticas e metaheurísticas para encontrar soluções aproximadas de forma rápida - e essa estratégia tem sido muito utilizada em aplicações reais, onde a velocidade de cálculo é tão importante quanto a qualidade da solução (REINA, 2012).

Em resumo, o Problema do Caixeiro Viajante fornece os conceitos essenciais de modelagem e análise de gráficos, que ajudam a explicar não só os fundamentos matemáticos por trás dos sistemas de roteirização, mas também a importância de otimizar percursos em aplicações reais. Esse entendimento é crucial para o desenvolvimento de teorias e métodos que visam reduzir os custos operacionais em contextos de transporte e logística.

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E RESTRIÇÕES

O estudo propõe um modelo de reotimização da malha de distribuição de uma empresa de bebidas, desenvolvido com o objetivo de reduzir o custo logístico e aumentar a produtividade da frota fixa.

Atualmente, o processo de transporte é estruturado de forma linear: os caminhões partem carregados das fábricas, realizam as entregas nos centros de distribuição (CDDs) - sempre em pedidos completos, em que toda a carga é direcionada para apenas um destino - e retornam vazios à origem. Esse retorno sem carga gera ociosidade dentro da jornada do veículo e, a partir dessa limitação, o modelo busca identificar rotas adicionais que aproveitem a capacidade ociosa do caminhão exclusivamente na volta, criando combinações entre fábricas e CDDs que mantenham a coerência operacional e resultem em menor custo total de transporte.

O modelo foi estruturado com base na modelagem do Problema do Caixeiro Viajante, adotando a lógica de percursos fechados com início e término na mesma fábrica, mas com restrições específicas ao cenário logístico da empresa analisada. Os trechos de ida são fixos e previamente determinados, pois representam pedidos consolidados da operação. Dessa forma, o modelo atua exclusivamente sobre os trechos de volta, identificando combinações adicionais que permitam aumentar o número de pontos produtivos percorridos, sem alterar a

estrutura inicial das rotas e sem comprometer os fluxos de entrega. O estudo foi aplicado inicialmente às fábricas e centros de distribuição localizados na região Sul do Brasil, onde há grande concentração de rotas de retorno sem aproveitamento logístico.

No que diz respeito às restrições, estas refletem as condições reais da operação e foram definidas de forma a manter a coerência com o processo logístico existente. Em síntese, os trechos de ida são fixos e não podem ser alterados, o caminhão deve obrigatoriamente retornar à fábrica de origem e, além disso, deve-se preservar o emparelhamento entre fábrica e CDD (que reflete um trecho produtivo de distribuição), garantindo que cada movimentação represente um fluxo completo de coleta e entrega - ou seja, o carregamento ocorre sempre em uma fábrica e a descarga em um centro de distribuição, não sendo consideradas movimentações de produtos entre CDDs diferentes.

Somente pedidos da frota fixa e referentes a produtos com embalagens descartáveis são considerados, uma vez que, nesse tipo de operação, o caminhão retorna vazio após a entrega, possibilitando o aproveitamento do trajeto de volta. Cada ponto pode ser visitado apenas uma vez, e as ligações possíveis entre eles são determinadas pela modelagem dos dados, que define quais combinações são permitidas e elimina conexões inviáveis, como a ligação direta entre dois CDDs (não são realizadas movimentações de produtos entre eles).

3.2 ESTRUTURA DE DADOS E IMPLEMENTAÇÃO EM VBA

A estruturação dos dados teve como objetivo organizar e consolidar as informações operacionais utilizadas como base para a aplicação do modelo de reotimização. As informações foram obtidas diretamente das bases corporativas de uma empresa do setor de bebidas, garantindo que os resultados representassem condições reais de operação. Todos os dados foram tratados e organizados em planilha eletrônica, de forma a permitir sua utilização no modelo desenvolvido.

Após a consolidação dos dados, a planilha foi estruturada em três bases principais. A primeira contém o registro de todos os pedidos planejados para um determinado período, incluindo origem (fábrica), destino (CDD), tipo de produto, quantidade transportada e modal de transporte planejado. Essa base representa a demanda efetiva da operação e foi utilizada como ponto de partida para a definição dos trechos de ida fixos. A partir dela, foram filtrados apenas os pedidos válidos para o modelo, de acordo com critérios operacionais como região atendida, tipo de produto e restrições de frota, citados anteriormente.

A segunda base consolida os custos médios de transporte entre cada combinação de fábrica e centro de distribuição, atualizados quinzenalmente conforme o planejamento logístico e os contratos ativos da empresa. Essa base foi utilizada como referência para compor duas das matrizes de custo empregadas no modelo:

- 1) A matriz de custo inicial, que reflete os valores atuais da operação conforme o modal planejado;
- 2) E a matriz de custo ótimo, que considera exclusivamente os custos da frota fixa, permitindo a comparação direta entre o cenário real e o cenário proposto de otimização.

A terceira base contém os tempos médios de ciclo e outras informações operacionais associadas a cada trecho de transporte, servindo de insumo para a formação da matriz de tempos, utilizada posteriormente para o cálculo dos desvios de percurso e validação das rotas.

As três bases foram tratadas e integradas em VBA, responsável por filtrar, cruzar e padronizar as informações de forma a garantir consistência entre origens, destinos e parâmetros de custo e tempo. O resultado deste processamento foi a geração das três matrizes principais - custo inicial, custo ótimo e tempos de deslocamento - que sintetizam as condições reais da operação e servem como insumo direto para a modelagem matemática apresentada nas etapas seguintes, além da tabela de pedidos válidos, que representa os trechos fixos de ida considerados pelo modelo.

3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática proposta foi desenvolvida com base no Problema do Caixeiro Viajante, apresentado no referencial teórico, mas adaptada para representar as condições operacionais do problema de distribuição analisado. No modelo clássico, o objetivo é determinar o percurso de menor custo que percorra todos os pontos e retorne ao ponto de origem. No contexto deste trabalho, essa lógica é aplicada de forma parcial: como os trechos de ida já são definidos previamente pelos pedidos consolidados da operação, o modelo atua sobre o retorno, identificando novas combinações de deslocamentos possíveis entre fábricas e centros de distribuição.

Com essa estrutura, busca-se maximizar o número de trechos produtivos na volta, ampliando a capacidade de distribuição da frota fixa e aumentando a eficiência do processo

logístico, principalmente em períodos de alta demanda. Assim, mantém-se a base conceitual do TSP - de percursos fechados e retorno à origem -, mas com um objetivo distinto: expandir o aproveitamento da frota e potencializar o volume movimentado sem comprometer a coerência operacional das rotas existentes. Os conjuntos e parâmetros estabelecidos foram:

- N : conjunto de pontos (fábricas e centros de distribuição).
- o : ponto de origem (fábrica inicial).
- d : destino da ida (CDD atendido inicialmente).
- $n = |N|$: número total de pontos considerados.
- T_{ij} : tempo médio de deslocamento entre i e j .
- T_{base} : tempo total do percurso original (ida e volta).
- α : limite percentual máximo de desvio de tempo permitido.

Variáveis:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o arco } (i,j) \text{ for utilizado na rota de volta;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad \forall i, j \in N; i \neq j$$

Função objetivo:

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}$$

Restrições:

$$1) \sum_{j=1}^n x_{dj} = 1$$

$$2) \sum_{i=1}^n x_{id} = 0$$

$$3) \sum_{j=1}^n x_{oj} = 0$$

$$4) \sum_{i=1}^n x_{io} = 1$$

$$5) \sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = 0, \quad \forall i \in N; i \neq o, d$$

$$6) \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in N$$

$$7) \sum_{j=1}^n x_{ji} \leq 1, \quad \forall i \in N$$

$$8) u_i + 1 \leq u_j + M(1 - x_{ij}), \quad \forall i, j \in N; i \neq j$$

$$9) u_d = 1, \quad 1 \leq u_i \leq n, \quad \forall i \in N$$

$$10) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ij} x_{ij} \leq (1 + \alpha) \cdot T_{base}$$

$$11) x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad u_i \in R_+, \quad \forall i, j \in N$$

O modelo proposto é composto por variáveis de decisão que representam, de forma estruturada, o comportamento da rota de retorno. As variáveis binárias x_{ij} indicam se um determinado arco (i, j) é utilizado na rota - assumindo valor 1 quando o deslocamento ocorre e 0 caso contrário -, enquanto as variáveis contínuas u_i definem a posição relativa de cada ponto i na sequência de visita, sendo utilizadas como mecanismo auxiliar para eliminar subrotas e garantir a conectividade do percurso. A função objetivo, por sua vez, busca maximizar o número total de trechos produtivos incluídos na rota de volta, aumentando o aproveitamento logístico da frota fixa e reduzindo o número de retornos vazios.

As restrições (1), (2), (3) e (4) asseguram o fechamento do ciclo logístico, determinando que o trajeto de retorno sempre se inicie no centro de distribuição atendido inicialmente e termine na fábrica de origem. As restrições (5), (6) e (7) garantem a conservação de fluxo, de modo que cada ponto intermediário possua, no máximo, uma entrada e uma saída, evitando sobreposições e rotas inviáveis.

As restrições (8) e (9) correspondem à formulação clássica de Miller–Tucker–Zemlin, responsável por eliminar subrotas e assegurar que o percurso resultante seja contínuo e conectado. Essa lógica estabelece uma sequência entre os nós visitados, representada pelas variáveis u_i , que ordenam os pontos da rota de forma coerente com o fluxo da viagem.

A restrição (10) impõe um limite máximo de tempo total permitido, garantindo que o trajeto proposto não ultrapasse em α do tempo do percurso original (T_{base}), mantendo a viabilidade operacional e temporal das soluções encontradas. Por fim, as últimas restrições (11) definem o domínio das variáveis, estabelecendo x_{ij} como binária e u_i como contínua positiva.

3.4 IMPLEMENTAÇÃO EM PYTHON

A formulação matemática apresentada no tópico anterior foi implementada em Python utilizando o solver SCIP, acessado por meio da biblioteca PySCIPOpt. As matrizes de custo e tempo consolidadas previamente em VBA foram importadas para o código em formato estruturado, permitindo associar cada arco (i, j) aos respectivos valores operacionais. A partir do conjunto de pontos definido no modelo, foram criadas automaticamente as variáveis binárias x_{ij} e as variáveis auxiliares u_i , mantendo correspondência direta com a formulação teórica.

Cada restrição matemática foi então traduzida para o solver de forma equivalente, incluindo as condições de origem e destino, a conservação de fluxo, os limites de entrada e saída por ponto, a formulação MTZ utilizada para eliminação de subrotas e o limite máximo de tempo total permitido para o percurso. A função objetivo também foi construída de acordo com o modelo original, maximizando o número de trechos produtivos que podem ser inseridos na rota de retorno. Após a construção completa do modelo, o solver executou o processo de otimização e retornou o conjunto de trechos selecionados, permitindo avaliar o desempenho logístico da rota obtida.

Em conjunto, a modelagem matemática e sua implementação computacional traduzem a lógica do problema proposto, que adapta a estrutura tradicional do TSP para um contexto prático de transporte. O foco desloca-se da minimização de custos para a maximização do aproveitamento da frota em trajetos de retorno, possibilitando explorar combinações viáveis entre fábricas e centros de distribuição sem comprometer a coerência operacional das rotas existentes. A integração entre a formulação e o solver em Python garante que o comportamento do modelo teórico seja reproduzido fielmente na aplicação computacional, assegurando consistência entre a abordagem analítica e a solução obtida.

3.5 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO E MÉTRICAS

A avaliação das soluções geradas pelo modelo foi conduzida com base em três elementos principais: o número de trechos produtivos adicionados à rota de retorno, o limite temporal permitido para execução da viagem e o impacto financeiro associado aos trechos selecionados. A combinação desses critérios permite analisar tanto o potencial de ampliação da rede quanto a viabilidade operacional das rotas identificadas.

O primeiro ponto de análise está ligado à própria função objetivo, que busca maximizar a quantidade de trechos produtivos inseridos no retorno. Esse indicador expressa diretamente o ganho estrutural gerado pelo modelo ao transformar retornos vazios em deslocamentos úteis. A opção por maximizar trechos não está relacionada à irrelevância dos custos, mas sim ao foco do trabalho: avaliar o potencial de expansão da malha de distribuição utilizando a frota existente, quantificando o aumento de produtividade possível dentro das condições operacionais reais.

O segundo critério considera o tempo total permitido para o percurso de retorno, controlado pelo parâmetro α . Esse parâmetro funciona como limitador operacional, definindo o prazo máximo em relação ao tempo original da rota. Sua variação permite explorar cenários mais rígidos ou mais flexíveis, avaliando o impacto da tolerância temporal sobre a quantidade de trechos produtivos capaz de ser adicionada. Dessa forma, o tempo atua como o principal fator de restrição, influenciando diretamente a viabilidade das combinações sugeridas.

A partir dos trechos selecionados pelo modelo dentro do limite temporal, realiza-se a avaliação de custos. Para cada trecho produtivo incluído, compara-se o custo atual da operação - que considera o deslocamento padrão de ida e volta - com o custo ótimo, em que o retorno vazio é eliminado no cenário proposto, reduzindo pela metade o valor da viagem e sempre utilizando o valor tabelado da frota fixa.

Essa comparação permite mensurar o impacto financeiro das combinações identificadas, sempre a partir dos trechos efetivamente selecionados pelo algoritmo. Assim, o custo opera como uma métrica complementar, utilizada para avaliar a viabilidade econômica das rotas sugeridas.

Em conjunto, esses critérios - maximização de trechos, respeito ao limite temporal e análise de custos - fornecem uma visão completa do desempenho do modelo, permitindo avaliar tanto o potencial de ganho logístico quanto a compatibilidade operacional e financeira das soluções obtidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação do modelo permitiu avaliar de forma estruturada como a formulação proposta se comporta diante de rotas reais da operação e em que medida é capaz de ampliar a produtividade da frota. Todas as soluções geradas foram consistentes com as restrições impostas, não apresentaram subrotas e respeitaram os limites temporais definidos, demonstrando que o modelo é operacionalmente viável e computacionalmente eficiente.

Após o tratamento dos dados iniciais pelo código em VBA, as análises foram conduzidas sobre um conjunto filtrado de 40 pedidos válidos da operação na Região Sul. Cada pedido corresponde a uma instância de rota composta por um trecho fixo de ida entre uma fábrica e um centro de distribuição, podendo existir diferentes pedidos associados a uma mesma combinação de origem e destino. Esse conjunto reflete a demanda real disponível no período analisado e serve como base para avaliar a capacidade do modelo em identificar trechos produtivos adicionais no trajeto de retorno.

Considerando um parâmetro de tempo $\alpha = 0,4$, que permite a expansão de até 40% sobre o tempo original da rota, o modelo identificou oportunidades de inserção de trechos produtivos em 21 dos 40 pedidos analisados. Esse resultado evidencia que uma parcela relevante das viagens atualmente realizadas com retorno vazio possui potencial de reaproveitamento, desde que respeitadas as conexões possíveis entre fábricas e centros de distribuição.

A economia estimada nas rotas otimizadas totalizou R\$ 54.439,13, refletindo a diferença entre o custo atual (ida e volta) e o custo equivalente obtido com a frota fixa (apenas ida) para os todos os deslocamentos considerados. Além disso, o tempo de processamento do modelo em aproximadamente um segundo reforça a eficiência da implementação em Python e a aderência do método a cenários operacionais que exigem respostas rápidas.

Para melhor compreensão do comportamento geral do modelo, apresenta-se a seguir a distribuição das soluções de acordo com o número de trechos produtivos adicionados. A TABELA 1 consolida os principais indicadores operacionais obtidos para cada grupo de rotas, permitindo visualizar a frequência com que diferentes níveis de melhoria ocorreram, a economia acumulada em cada categoria e o ganho médio por trecho.

TABELA 1 - ECONOMIA GERADA POR TRECHOS ADICIONADOS

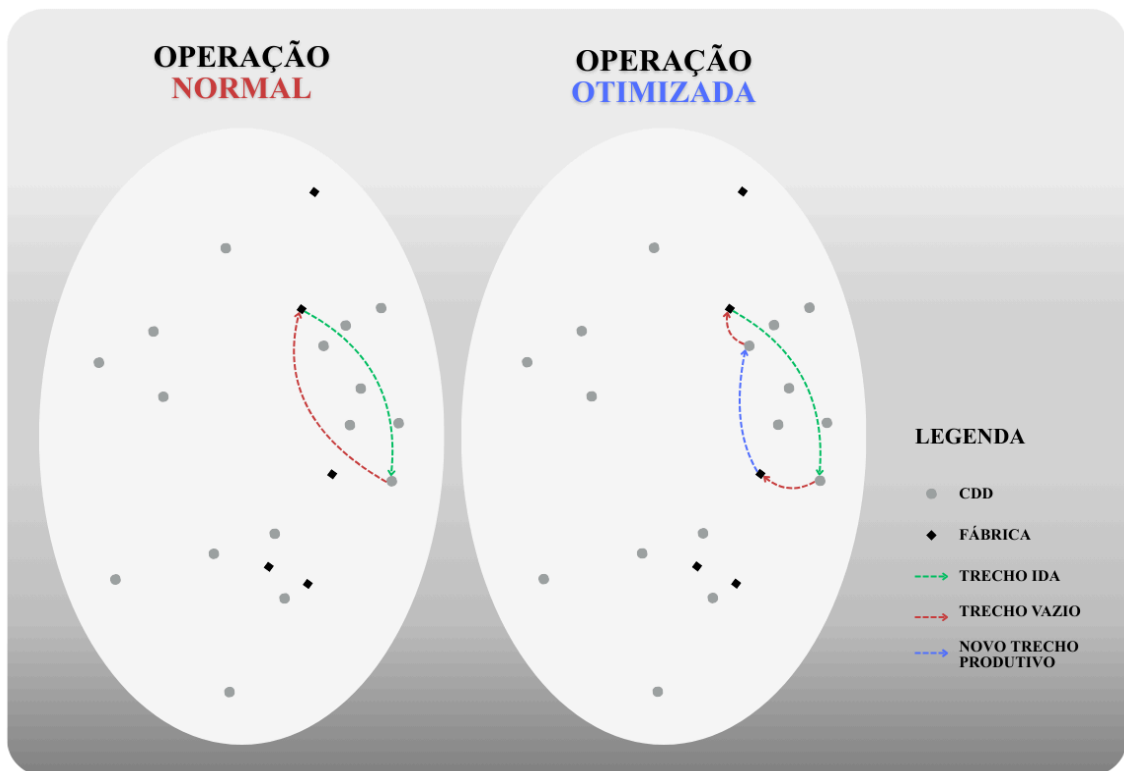
Trechos	Número	Economia	Economia média	Economia média por
---------	--------	----------	----------------	--------------------

adicionados	de pedidos	total (R\$)	por pedido (R\$)	trecho adicionado (R\$)
0	19	R\$ 0,00	-	-
1	6	R\$ 9.911,69	R\$ 1.651,95	R\$ 1.651,95
2	7	R\$ 21.981,73	R\$ 3.140,25	R\$ 1.570,12
3	8	R\$ 22.545,72	R\$ 2.818,21	R\$ 939,40

FONTE: O autor (2025).

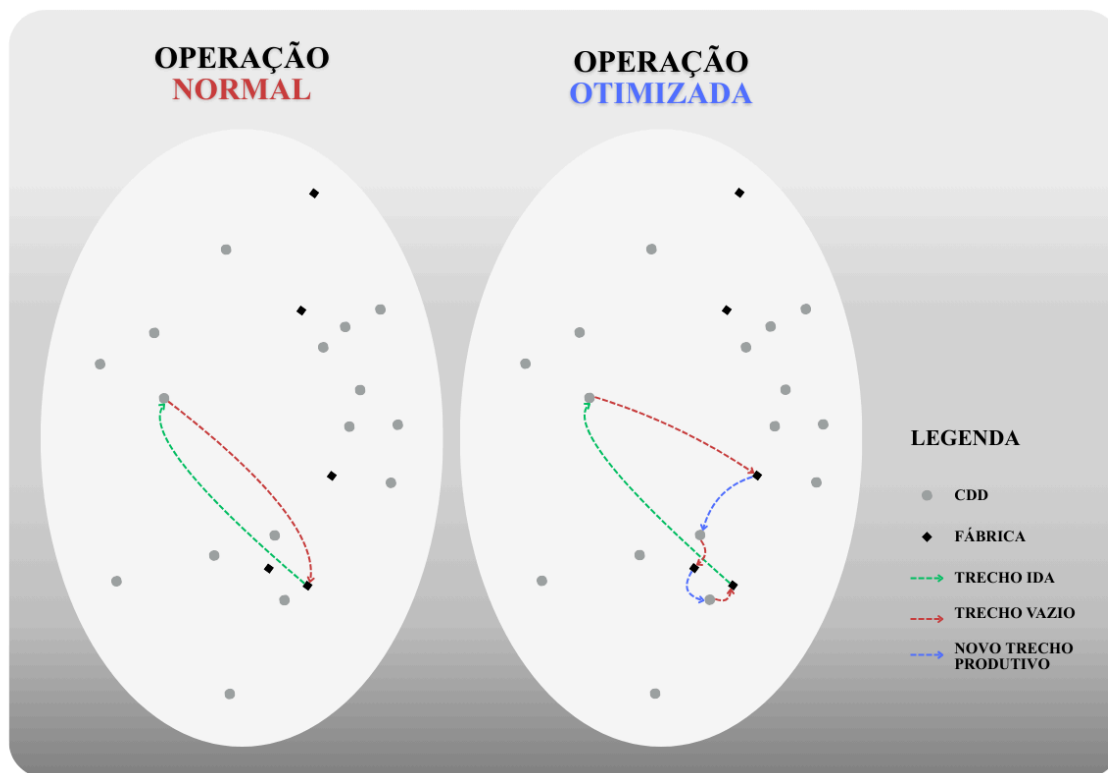
A distribuição dos resultados evidencia diferenças importantes no comportamento do modelo conforme o número de trechos produtivos adicionados. Entre os 40 pedidos analisados, 19 não apresentaram possibilidade de melhoria, mantendo retorno vazio, enquanto os outros 21 receberam entre 1 e 3 novos trechos ao retorno (somando 65 entregas possíveis, considerando os pedidos originais). Além disso, as FIGURAS 1 a 3 abaixo apresentam três soluções produzidas pelo modelo para diferentes quantidades de trechos adicionados, permitindo visualizar a evolução e o comportamento das rotas conforme o problema se torna mais denso e com trechos iniciais mais distantes.

FIGURA 1 - EXEMPLO DE SOLUÇÃO COM 1 TRECHO ADICIONADO



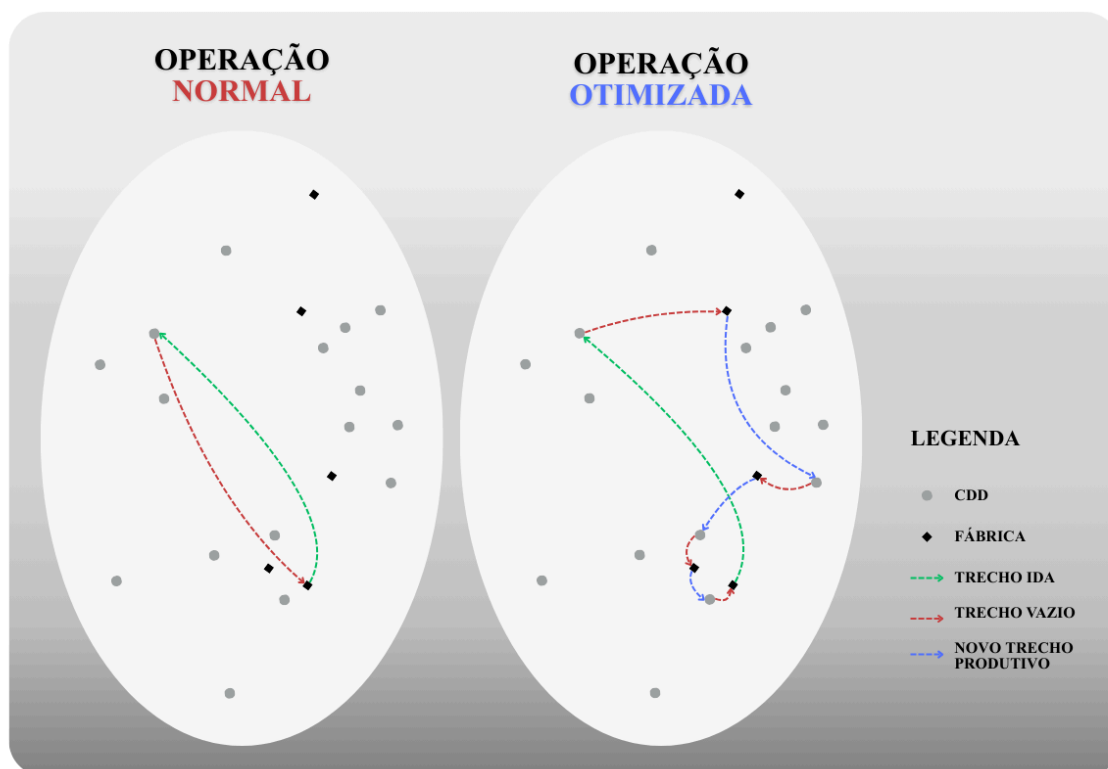
FONTE: O autor (2025).

FIGURA 2 - EXEMPLO DE SOLUÇÃO COM 2 TRECHOS ADICIONADOS



FONTE: O autor (2025).

FIGURA 3 - EXEMPLO DE SOLUÇÃO COM 3 TRECHOS ADICIONADOS



FONTE: O autor (2025).

No cenário analisado, um dos principais motivos relacionados aos pedidos que não puderam ser otimizados está associado ao tempo base reduzido (tempo total do percurso original de ida e volta), fator que limita a construção de trajetos compatíveis dentro do limite temporal imposto, como indicado na TABELA 2.

TABELA 2 - TEMPO BASE DOS PEDIDOS VÁLIDOS EM RELAÇÃO AOS TRECHOS ADICIONADOS

Trechos adicionados	Número de pedidos	Tempo base médio (horas)
0	19	9,50
1	6	32,58
2	7	48,93
3	8	62,96

FONTE: O autor (2025).

A análise conjunta das tabelas evidencia um padrão claro: rotas com maior tempo base apresentam maior probabilidade de receber trechos adicionais, pois oferecem mais flexibilidade operacional dentro do limite temporal permitido. Pedidos com tempo base reduzido - como aqueles no grupo de zero trechos adicionados, com média de 9,50 horas - possuem pouca margem para desvio, o que restringe fortemente a possibilidade de triangulação. Já nos grupos em que o modelo acrescentou um, dois ou três trechos, observa-se aumento progressivo do tempo base médio, ampliando o espaço de busca do modelo e permitindo a identificação de mais combinações viáveis.

A relação entre tempo base, número de trechos adicionados e economia também se mostrou consistente. As rotas com dois trechos produtivos adicionais apresentaram a maior economia média por pedido (R\$ 3.140,25), indicando que, nesse grupo, o modelo encontrou configurações particularmente eficientes de aproveitamento do retorno, seja pela flexibilidade temporal adicional, seja pela estrutura favorável das ligações disponíveis. A economia média por trecho, embora ligeiramente menor no grupo com três pontos produtivos, permanece significativa - reforçando que trajetos mais extensos tendem a oferecer grande potencial para redução de retornos vazios.

4.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO DESVIO DE TEMPO PERMITIDO

A variação do parâmetro α permite avaliar como a flexibilização do tempo máximo da rota influencia a capacidade do modelo de identificar trechos produtivos no retorno. Como α representa o desvio percentual permitido em relação ao tempo base, ampliando o limite para $(1 + \alpha) \cdot T_{base}$, valores menores indicam maior rigidez operacional, enquanto valores maiores ampliam o espaço de busca do modelo. As TABELAS 3, 4 e 5 apresentam o desempenho do modelo para diferentes variações do parâmetro.

TABELA 3 - ECONOMIA GERADA POR TRECHOS ADICIONADOS ($\alpha = 0,2$)

Trechos adicionados	Número de pedidos	Economia total (R\$)	Economia média por pedido (R\$)	Economia média por trecho adicionado (R\$)
0	24	R\$ 0,00	-	-
1	7	R\$ 13.144,90	R\$ 1.877,84	R\$ 1.877,84
2	8	R\$ 21.149,34	R\$ 2.643,67	R\$ 1.321,83
3	1	R\$ 3.802,64	R\$ 3.802,64	R\$ 1.267,55

FONTE: O autor (2025).

TABELA 4 - ECONOMIA GERADA POR TRECHOS ADICIONADOS ($\alpha = 0,3$)

Trechos adicionados	Número de pedidos	Economia total (R\$)	Economia média por pedido (R\$)	Economia média por trecho adicionado (R\$)
0	22	R\$ 0,00	-	-
1	6	R\$ 15.728,78	R\$ 2.621,46	R\$ 2.621,46
2	7	R\$ 20.060,96	R\$ 2.865,85	R\$ 1.432,93
3	5	R\$ 11.633,68	R\$ 2.326,74	R\$ 775,58

FONTE: O autor (2025).

TABELA 5 - ECONOMIA GERADA POR TRECHOS ADICIONADOS ($\alpha = 0,5$)

Trechos adicionados	Número de pedidos	Economia total (R\$)	Economia média por pedido (R\$)	Economia média por trecho adicionado (R\$)
0	19	R\$ 0,00	-	-
1	5	R\$ 8.681,74	R\$ 1.736,35	R\$ 1.736,35
2	5	R\$ 13.144,47	R\$ 2.628,89	R\$ 1.314,45
3	11	R\$ 36.577,63	R\$ 3.325,24	R\$ 1.108,41

FONTE: O autor (2025).

A interpretação conjunta dessas tabelas evidencia um padrão claro: conforme o valor de α aumenta, cresce também o número de pedidos com possibilidade de triangulação. A economia total gerada pelo modelo também aumenta conforme o valor do parâmetro cresce, refletindo a ampliação das rotas viáveis. Para complementar essa análise detalhada, a TABELA 6 apresenta uma comparação consolidada entre os valores de α , permitindo visualizar de forma sintética o ganho total e a economia média por pedido em cada cenário.

TABELA 6 - COMPARAÇÃO DE ECONOMIA PARA DIFERENTES α

α	Número de pedidos com pelo menos um trecho adicionado	Economia total (R\$)	Economia média por pedido (R\$)
0,2	16	R\$ 38.096,88	R\$ 952,42
0,3	18	R\$ 47.423,42	R\$ 1.185,59
0,4	21	R\$ 54.439,14	R\$ 1.360,98
0,5	21	R\$ 58.403,84	R\$ 1.460,10

FONTE: O autor (2025).

Com base nessa consolidação, observa-se que a economia total cresce de R\$ 38.096,88 em $\alpha = 0,2$ para R\$ 58.403,84 em $\alpha = 0,5$, um aumento superior a 50%. A economia média por pedido segue tendência semelhante, evoluindo de R\$ 952,42 para R\$ 1.460,10 entre os extremos analisados. Parte desse crescimento está associada ao maior número de pedidos otimizados, mas outro aspecto importante é que valores mais altos de α liberam rotas

mais extensas e conectadas, permitindo combinações que eram inviáveis em cenários mais rígidos.

Do ponto de vista operacional, o cenário com $\alpha = 0,2$ destaca as limitações impostas pela rigidez temporal. Ainda assim, mesmo esse cenário mais conservador produz economia relevante para a operação, sugerindo que, em períodos de maior pico de utilização da frota fixa - como semanas de alta demanda - pequenas flexibilizações no tempo permitido podem gerar impactos positivos sem alterar substancialmente a programação original das rotas.

Nos cenários intermediários ($\alpha = 0,3$ e $\alpha = 0,4$), observa-se um equilíbrio entre ganho operacional e restrição temporal, com ampliação consistente do número de pedidos beneficiados e economias médias mais elevadas. Já em $\alpha = 0,5$, o ganho financeiro é o maior entre os cenários, mas a ampliação do tempo permitido pode gerar impactos operacionais dependendo da disponibilidade da frota.

Em síntese, a análise de sensibilidade mostra que o modelo responde de forma coerente às alterações do parâmetro destacado: valores maiores resultam em mais oportunidades de triangulação e maior economia total, enquanto valores menores restringem severamente o espaço de busca do modelo. Nesse contexto, o parâmetro adotado como referência ($\alpha = 0,4$) apresenta um equilíbrio robusto entre ganho operacional, aderência ao tempo base e viabilidade prática.

4.2 IMPACTO OPERACIONAL

Embora os resultados tenham sido obtidos a partir de um conjunto limitado de 40 pedidos da região Sul, o comportamento observado indica um potencial operacional significativamente maior quando aplicado ao volume real de demandas da empresa. No cenário de referência ($\alpha = 0,4$), a economia média por pedido foi de aproximadamente R\$ 1.360,98, associada exclusivamente à inclusão de trechos produtivos no retorno das rotas analisadas. Considerando, de forma ilustrativa, um volume mensal de 350 pedidos válidos com características semelhantes às da amostra, a economia projetada na região seria da ordem de R\$ 476 mil por mês, caso o modelo fosse incorporado ao processo de planejamento. Esse resultado evidencia o efeito multiplicador da solução quando aplicada de forma sistemática e recorrente.

Além do impacto financeiro direto, o modelo apresenta elevada capacidade de escala geográfica. Embora a aplicação inicial tenha sido restrita à região Sul, a lógica utilizada é totalmente reutilizável para outras regiões do país. As bases de dados permanecem as

mesmas; a adaptação consiste apenas em alterar o parâmetro de filtro de região no código de tratamento em VBA, permitindo que os pedidos de outras áreas alimentem exatamente a mesma estrutura do modelo.

A execução completa do modelo em Python para o conjunto de pedidos analisado levou entre um e três segundos, dependendo do valor de α . Esse baixo tempo de processamento indica que a aplicação prática do modelo consegue ser operacionalmente viável: ele pode ser executado de forma periódica ou sob demanda para avaliar novas janelas de pedidos válidos, sem necessidade de infraestrutura adicional ou integração com sistemas corporativos. A arquitetura adotada baseada no tratamento dos dados via VBA e na resolução do modelo em Python facilita a replicação do processo sempre que novas bases de custo, tempo ou pedidos forem disponibilizadas pela operação.

No entanto, apesar de a aplicação piloto composta por 40 pedidos ter sido resolvida em tempos muito reduzidos, é importante reconhecer que o problema pertence à classe dos NP-difíceis. Isso significa que o desempenho observado não garante, por si só, que instâncias substancialmente maiores manterão tempos de resolução igualmente baixos. Assim, embora a formulação seja replicável para outras regiões, não é possível afirmar, com os dados disponíveis, até que ponto o solver manterá desempenho adequado conforme o tamanho e a complexidade da rede aumentam.

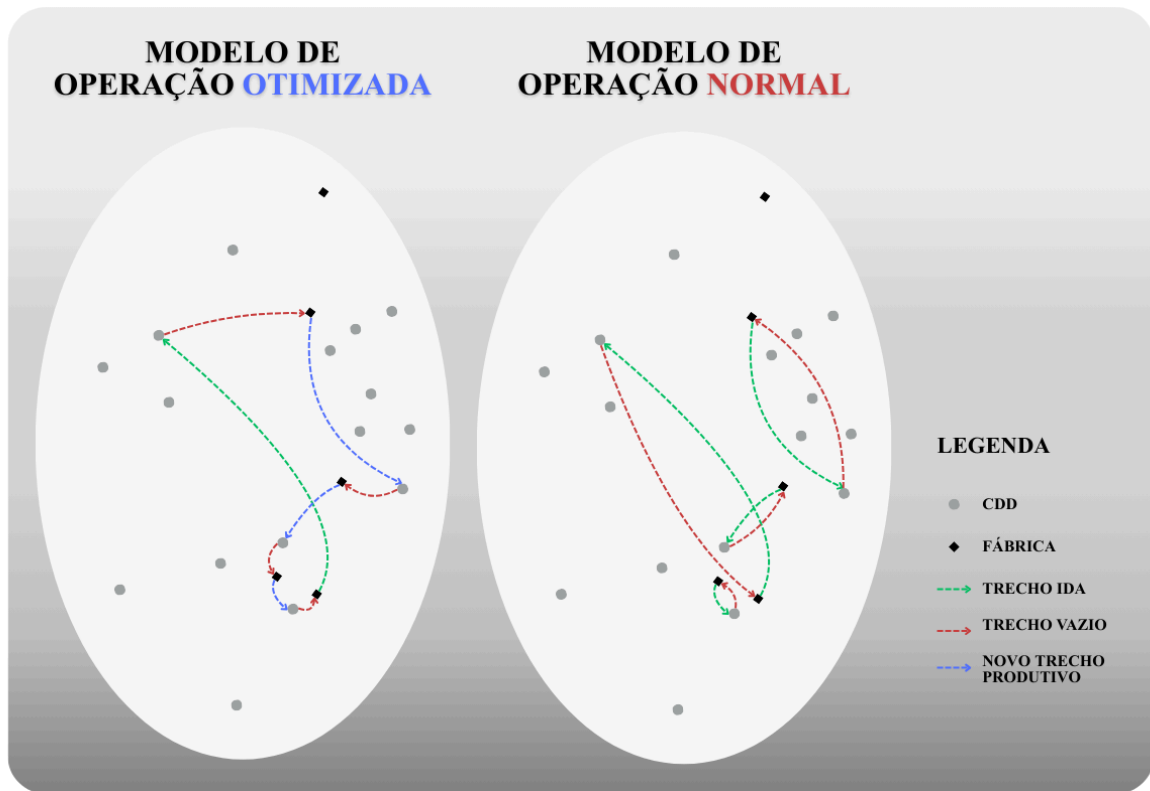
Em conjunto, esses elementos mostram que o impacto do modelo vai além das economias pontuais observadas nos experimentos: trata-se de uma ferramenta capaz de elevar estruturalmente a produtividade da malha de distribuição, ampliando o uso da frota fixa e oferecendo suporte tático ao time de logística. A robustez da formulação, aliada ao baixo tempo de processamento e à facilidade de adaptação para diferentes regiões, reforça o potencial de adoção do modelo como parte permanente do processo de planejamento de transportes da empresa.

4.2.1 Ganho estrutural no tempo total de operação

Além do impacto financeiro direto e da ampliação da produtividade no retorno, foi realizada uma análise adicional para avaliar o efeito do modelo sobre o tempo total de operação da frota. Essa avaliação consistiu em comparar dois cenários distintos: no primeiro, considerou-se o tempo agregado de todos os deslocamentos na rota otimizada; no segundo, calculou-se o tempo total que seria necessário para executar os mesmos trechos produtivos seguindo o modo de operação atual, em que cada trecho é realizado de forma independente,

obedecendo à lógica de saída da origem, descarga no destino, e retorno direto para a origem, como ilustrado na FIGURA 4.

FIGURA 4 - COMPARAÇÃO DA OPERAÇÃO NORMAL E OTIMIZADA



FONTE: O autor (2025).

O objetivo dessa comparação foi mensurar o impacto estrutural da estratégia de encadeamento de trechos produtivos. Enquanto o modelo permite que o caminhão percorra múltiplos pontos antes de retornar à fábrica de origem, a prática tradicional força o retorno imediato após cada entrega, gerando um acréscimo substancial no tempo gasto em trajetos improdutos.

Os resultados evidenciam uma diferença expressiva entre os dois cenários. A solução proposta para $\alpha = 0,4$ fez com que o modelo otimizado tivesse a oportunidade de incluir um total de 44 novos trechos produtivos a 21 pedidos válidos distintos, somando 65 entregas possíveis. Considerando o tempo que seria demandado para realizar todas essas entregas separadamente no modelo de operação normal (como exemplificado na FIGURA 4), o modelo de operação otimizada possibilitaria reduzir o tempo total do conjunto de deslocamentos de 1.672,92 horas para 1.384,34 horas.

Isso significa que a solução possui a capacidade de planejar mais deslocamentos produtivos em um tempo de operação mais curto, além de permitir um cenário otimizado de

entregas. Em termos agregados, são eliminadas 288,58 horas indesejadas e obtém-se um aumento de cerca de 210% na quantidade de entregas executadas em relação aos 21 pedidos originais, demonstrando expressivo ganho de eficiência no uso das rotas de retorno.

Esse comportamento reforça a necessidade de revisar o modo de alocação da frota no transporte de produtos descartáveis. O retorno obrigatório à origem, embora adequado para produtos com embalagens retornáveis (em que existe retorno de ativo de giro para a fábrica), gera perdas operacionais substanciais quando aplicado a rotas onde não há necessidade de retorno imediato. Nesse contexto, os resultados sugerem a viabilidade de uma abordagem híbrida, na qual parte da frota permanece dedicada ao modelo tradicional, enquanto outra parte pode executar rotas mais extensas e produtivas, alinhadas ao padrão de comportamento observado nas simulações - especialmente nos cenários com maior flexibilização do parâmetro α .

Essa estratégia permitiria não apenas reduzir retornos vazios, mas também ampliar a utilização da frota, aumentar a quantidade de entregas realizadas por viagem e gerar economias significativas de tempo e custo, contribuindo para uma operação logística mais eficiente e adaptada à realidade da malha de distribuição estudada.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um método de reotimização para o aproveitamento do retorno da frota fixa de uma empresa de bebidas, fundamentado em um modelo de programação mista inspirado no Problema do Caixeiro Viajante. A abordagem proposta demonstrou capacidade de transformar rotas atualmente executadas com retorno vazio em percursos produtivos, respeitando as restrições operacionais e os limites temporais da operação. Os resultados obtidos evidenciam que a triangulação de trechos pode gerar ganhos relevantes mesmo em um conjunto reduzido de pedidos, tanto em termos de economia financeira quanto na redução do tempo total de operação.

Os experimentos realizados indicaram que o parâmetro de flexibilidade temporal (α) exerce influência direta sobre a quantidade de rotas otimizadas e sobre o volume total de economia alcançado. O cenário de referência, com $\alpha = 0,4$, apresentou o melhor equilíbrio entre viabilidade operacional e ganhos econômicos, oferecendo uma diretriz prática para sua aplicação. Além disso, a comparação entre o tempo total das rotas otimizadas e o tempo necessário para a execução dos mesmos deslocamentos no modo atual revelou um ganho

estrutural expressivo, sugerindo que estratégias de encadeamento de trechos podem melhorar significativamente a utilização da frota.

O modelo desenvolvido mostrou-se escalável, eficiente e facilmente replicável para outras regiões da operação, exigindo apenas ajustes simples no processo de filtragem de dados. Seu baixo custo computacional reforça o potencial de adoção como ferramenta de apoio ao planejamento tático, ampliando a capacidade de identificação de oportunidades logísticas que dificilmente seriam captadas manualmente.

Embora o estudo tenha sido conduzido sobre um conjunto reduzido de pedidos e com um escopo delimitado às variáveis essenciais do processo, os resultados obtidos revelam um cenário com amplas oportunidades de desenvolvimento. Elementos como capacidade dos veículos, janelas de entrega, características dos produtos e restrições adicionais de carga e descarga podem ser incorporados em extensões futuras do modelo, ampliando sua precisão e aderência operacional. Do mesmo modo, a aplicação em um volume maior de pedidos ou em outras regiões da operação permitirá validar o comportamento observado e aprofundar o entendimento sobre o potencial de reaproveitamento do retorno em escala. Essas possibilidades indicam um caminho promissor para evoluções metodológicas e para o amadurecimento da solução como ferramenta estratégica no planejamento logístico.

Em síntese, o trabalho evidencia que a reotimização das rotas de retorno, quando conduzida de forma estruturada e apoiada por técnicas de programação mista, representa uma oportunidade concreta de aumento de eficiência e redução de desperdícios na operação de transporte. A solução proposta constitui um passo relevante na direção de uma logística mais produtiva, flexível e aderente às necessidades reais da empresa.

REFERÊNCIAS

CHOPRA, S.; MEINDL, P. *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.

DANTZIG, G. B.; FULKERSON, R.; JOHNSON, S. *Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem*. Santa Monica: The Rand Corporation, 1954.

DUAN, Chao; SONG, Xingchen; LIU, Zhiwen. *A local search with chain search path strategy for real-world many-objective vehicle routing problem*. Soft Computing, Springer, 2025. DOI: 10.1007/s00500-025-09033-7.

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. New York: W. H. Freeman, 1979.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. *Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos*. [S.l.]: [s.n.], 2000.

ILOS. Estoque rouba a cena nos custos logísticos do Brasil em 2023. 25 out. 2024. Disponível em: <https://ilos.com.br/estoque-rouba-a-cena-nos-custos-logisticos-do-brasil-em-2023/>. Acesso em: 06 junho 2025.

LIU, Guizhou; WANG, Yi; ZHANG, Junjie. *Metaheuristic approaches for the stochastic capacitated multi-depot VRP*. Expert Systems with Applications, 2025. DOI: 10.1016/j.eswa.2025.122274.

MILLER, C. E.; TUCKER, A. W.; ZEMLIN, R. A. *Integer programming formulation of traveling salesman problems*. Journal of the ACM, v. 7, n. 4, p. 326–329, 1960.

RAO, H.; AGARWAL, V. *Modular vehicle routing problem: Applications in logistics*. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, v. 46, n. 3, p. 2733-2741, 2024. DOI: 10.3233/JIFS-231156.

REINA, C. D. *Roteirização de veículos com janelas de tempo utilizando algoritmo genético*. [Dissertação (Mestrado)] – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

SOLOMON, M. M. *Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints*. Operations Research, v. 35, n. 2, p. 254-265, 1987.