



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do curso de Engenharia de Produção



**Estudo de Caso: Roteirização de Frota de Veículos em uma empresa
prestadora de serviços de monitoramento ambiental**

Vinícius Dutra Pinheiro

João Monlevade

2024

Vinícius Dutra Pinheiro

Estudo de Caso: Roteirização de Frota de Veículos em uma empresa prestadora de serviços de monitoramento ambiental

Trabalho de conclusão de curso apresentado de Engenharia de Produção do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: Prof. D.Sc. Gilberto de Miranda Junior

João Monlevade

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P654e Pinheiro, Vinicius Dutra.

Estudo de caso [manuscrito]: roteirização de frota de veículos em uma empresa prestadora de serviços de monitoramento ambiental. / Vinicius Dutra Pinheiro. - 2024.

47 f.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto de Miranda Junior.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Administração do tempo. 2. Logística empresarial. 3. Otimização combinatória. 4. Veículos a motor - Frotas. 5. Veículos - Levantamentos de rotas. I. Miranda Junior, Gilberto de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Vinícius Dutra Pinheiro

Estudo de Caso: Roteirização de Frota de Veículos em uma empresa prestadora de serviços de monitoramento ambiental

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção

Aprovada em 07 de Fevereiro de 2024

Membros da banca

Prof. Dr. Gilberto de Miranda Junior - Orientador(a), ICEA/DEENP, Universidade Federal de Ouro Preto.

Prof. Dr. Alexandre Xavier Martins - ICEA/DEENP, Universidade Federal de Ouro Preto.

Prof. Dr. Rafael Frederico Alexandre - ICEA/DECSI, Universidade Federal de Ouro Preto.

Prof. Dr. Gilberto de Miranda Junior, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/02/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Gilberto de Miranda Júnior, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/02/2024, às 10:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0667900** e o código CRC **23A33B8C**.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, por todo apoio durante essa trajetória, por tornarem isso possível, por todo esforço e por acreditarem em mim. Sem eles, esse sonho não se tornaria real.

A minha noiva Gabriela, por todo amor e ajuda durante essa etapa. Sem você não seria possível.

À Universidade Federal de Ouro Preto, por proporcionar todo o conhecimento necessário para o exercício de minha futura profissão.

Ao meu orientador Gilberto de Miranda Junior e ao Prof. Dr. Ricardo Saraiva de Camargo, por compartilharem seus conhecimentos e experiências, auxiliando no desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso e por serem um exemplo e inspiração de profissional.

Aos professores presentes na banca examinadora, por contribuírem para o meu crescimento profissional.

Aos amigos, e em especial a República Piscina, Churrasco e Cerveja, pelo companheirismo e incontáveis momentos de descontração, que foram de suma importância para tornar minha caminhada mais leve.

A todos os demais, que direta ou indiretamente contribuíram para o meu sucesso, o meu muito obrigado!

Resumo

O Problema de Roteirização de Veículos, é uma das grandes preocupações da logística empresarial, estando relacionado com a otimização da distribuição de seus bens e serviços. Para execução desta pesquisa, foi implementado um algoritmo na linguagem de programação AMPL que combinou os algoritmos de Baldacci *et al.* (2004) e Bianchessia *et al.* (2017). Foi construído um banco de dados com as informações de uma empresa de monitoramento ambiental, que continha as coordenadas de seus clientes e o tempo de execução dos monitoramentos ambientais. A partir do algoritmo determinou-se a quantidade de equipes necessárias para atender toda carteira de clientes com cargas horárias específicas. Foram analisados sete grupos de carga horária, variando de 12 a 18 horas, em dois cenários distintos: um considerando fator de correção para autoestradas e outro sem considerá-lo. Após as análises, verificou-se que, no cenário com fator de correção, a carga horária mais eficiente foi de 17 horas, enquanto no cenário sem fator de correção, a carga horária ótima foi de 18 horas.

Palavras-chaves: Logística; Roteirização de Veículos; *Branch-and-cut*.

Abstract

The Vehicle Routing Problem is a major concern in business logistics, as it is associated with optimizing the distribution of goods and services. To conduct this research, an algorithm was implemented in the AMPL programming language, combining the algorithms proposed by Baldacci et al. (2004) and Bianchessia et al. (2017). A database was constructed with information from an environmental monitoring company, including the coordinates of its clients and the execution time of environmental monitoring activities. The algorithm determined the number of teams required to serve the entire client portfolio with specific working hours. Seven time groups were analyzed, ranging from 12 to 18 hours, in two different scenarios: one considering a correction factor for highways and another without it. After the analyses, it was found that, in the scenario with a correction factor, the most efficient working hours were 17, while in the scenario without a correction factor, the optimal working hours were 18.

Keywords: Logistics; Vehicle Routing; Branch-and-Cut.

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Algoritmo <i>Branch-and-cut</i> | 19 |
| Figura 2 - Caminho para uma rota de três clientes..... | 21 |
| Figura 3 - Sede Grupo Aqua Brasil..... | 23 |
| Figura 4: Mapa das cidades atendidas pelo Grupo Aqua Brasil..... | 23 |
| Figura 5 - Fluxograma da metodologia adotada..... | 26 |
| Figura 6 - Parâmetros do algoritmo..... | 30 |
| Figura 7 - Variáveis do algoritmo..... | 31 |
| Figura 8 - Função objetivo para Baldacci <i>et al.</i> (2004)..... | 32 |
| Figura 9 - Restrições de tempo de viagem baseadas em Bianchessi <i>et al.</i> (2017) | 33 |
| Figura 10 - Definições adicionais..... | 33 |
| Figura 11 - Rota para cada carga horária..... | 38 |
| Figura 12 - Rota para cada carga horária com fator de correção..... | 42 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Banco de dados principal..... | 27 |
| Tabela 2 - Carga horária da equipe | 35 |
| Tabela 3 - Execução do algoritmo sem fator de correção..... | 35 |
| Tabela 4 - Resultados das equipes por carga horária sem fator de correção..... | 36 |
| Tabela 5 - Horas totais gastas | 39 |
| Tabela 6 - Execução do algoritmo com fator de correção..... | 40 |
| Tabela 7 - Resultados das equipes por carga horária com fator de correção..... | 40 |
| Tabela 8 - Horas totais gastas com fator de correção | 43 |

Sumário

| | | |
|-----|---------------------------------------|----|
| 1 | Introdução | 13 |
| 1.1 | Objetivo | 15 |
| 1.2 | Objetivos Específicos | 15 |
| 2 | Revisão Bibliográfica..... | 17 |
| 2.1 | Logística | 17 |
| 2.2 | Cadeia de Suprimentos | 18 |
| 2.3 | Algoritmo <i>Branch-and-cut</i> | 19 |
| 2.4 | Algoritmo de Baldacci..... | 20 |
| 2.5 | Algoritmo de Bianchessia | 22 |
| 2.6 | Grupo Aqua Brasil | 22 |
| 3 | Metodologia..... | 25 |
| 4 | Resultados e Discussões | 35 |
| 5 | Conclusão | 44 |
| | Referências..... | 45 |

1 INTRODUÇÃO

Em sistemas logísticos planejar e gerenciar atividades de transporte de cargas é imprescindível, uma vez que representa grande parcela de custos das empresas. Assim, tem-se dois pontos centrais na distribuição logística: Problemas de Roteirização de Veículos e Problemas de Carregamento (ARPINI e ROSA, 2017).

O Problema de Roteirização de Veículos, é uma das grandes preocupações da logística empresarial, estando relacionado com a otimização da distribuição de seus bens e serviços (ACHUTHA, CACCETTA e HILL, 1997) (ALTABEEB, MOHSEN, *et al.*, 2021). Sendo assim um dos principais desafios enfrentados pelas empresas é a necessidade do transporte de atender com eficiência de custo e tempo as demandas do usuário final (PRAVEEN, KEERTHIKA, *et al.*, 2022). Enquanto isso, Problemas de Carregamento estão relacionados em como otimizar a forma de carregar mercadorias durante o transporte (ARPINI e ROSA, 2017).

Ao se buscar atender ambos os problemas, a literatura propõe o Problema de Roteirização de Veículos Capacitados (CVRP) (IORI e MARTELLO, 2013). Assim, o problema conhecido como CVRP consiste em projetar rotas eficientes de entrega para um conjunto específico de clientes, visando otimizar o atendimento em diversas localidades e o retorno ao ponto de partida, a partir das restrições de capacidade do veículo (BALDACCI, HADJICONSTANTINO e MINGOZZI, 2004).

Ao lidar com o CVRP, é essencial considerar diversos elementos e restrições ao criar as rotas. Entre esses fatores, destacam-se o custo do combustível, dos pneus e manutenção dos veículos, salário dos motoristas, o custo da distância percorrida, o tempo gasto para visitar os clientes e a capacidade do veículo em termos de carga. Além disso, existem restrições como janelas de tempo para realizar as visitas aos clientes (VRPTW), incompatibilidade de veículos e a coexistência de entregas ou coletas diferentes na mesma rota (BALDACCI, HADJICONSTANTINO e MINGOZZI, 2004). O Problemas de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo (VRPTW), envolvem elementos de roteamento e escalonamento e é um dos problemas mais estudados ao se tratar de otimização (BARANWAL, PAREKH, *et al.*, 2016).

Assim, diante do exposto, surge o seguinte questionamento de pesquisa: como otimizar a roteirização de uma frota, levando em consideração as rotas, tempo de serviço e a quantidade de veículos utilizados?

O problema de roteirização de veículos consiste em definir roteiros eficientes para os veículos, de forma a minimizar o custo total de atendimento. Cada roteiro deve iniciar e terminar no depósito ou base dos veículos, garantindo que todos os pontos sejam visitados uma única vez. Além disso, é necessário garantir que a demanda de cada rota não exceda a capacidade do veículo responsável por atendê-la. Portanto, o objetivo é encontrar uma solução que otimize a utilização dos veículos, a minimização dos custos e a garantia da eficiência na entrega dos produtos ou serviços (JUNIOR, NUNES, *et al.*, 2013).

A utilização de métodos de roteirização possibilita a otimização das rotas existentes, desenvolvidas em atendimentos mais inteligentes e eficientes. Isso permite aumentar a quantidade de atendimentos diários, atendendo os custos operacionais e abrindo oportunidades para captar mais clientes (JUNIOR, NUNES, *et al.*, 2013). Nesse sentido, será empregado o código Baldacci *et al.* (2004) como base para a criação de um algoritmo personalizado, adaptado às necessidades específicas da empresa em questão. Essa abordagem visa maximizar os benefícios da roteirização, garantindo que as demandas sejam atendidas de forma otimizada, garantindo a satisfação dos clientes e o crescimento do negócio.

É possível encontrar na literatura, estudos que tratam do problema de roteirização. Baldacci *et al.* (2004), propõem uma nova formulação de programação descrevendo um algoritmo que busca otimizar o atendimento de clientes. Bianchessia *et al.* (2017), apresenta uma nova formulação compacta, que reforçada por restrições de conectividade visa resolver o problema de orientação por equipe.

O presente trabalho, abordará os problemas enfrentados pela equipe de logística de uma empresa prestadora de serviços, na roteirização de seus veículos. A empresa atua na área de monitoramento ambiental, possui sede em João Monlevade - MG e atende diversas cidades em diferentes regiões no estado de Minas Gerais.

Neste estudo, buscamos complementar a literatura existente ao analisar uma empresa especializada em monitoramento ambiental. Buscando alternativas que possam otimizar a prestação de serviços. A intenção é investigar soluções que melhorem a eficiência operacional, além de contribuir para a melhoria de práticas internas.

Em relação à contribuição empírica, o presente trabalho oferece uma oportunidade para refletir sobre direções relacionadas à otimização de problemas de roteirização. Por meio de estudo de caso específico, contribui para o desenvolvimento de competências gerenciais na organização estudada. Isso ocorre quando os conceitos e práticas de roteirização são introduzidos, aprimorando assim o conhecimento estratégico relevante para o campo. Desta forma, este trabalho traz uma perspectiva prática e aplicada que contribui para o entendimento dos desafios envolvidos na otimização de roteirização e possíveis soluções. Isso pode ter um impacto positivo no desenvolvimento de práticas e abordagens estratégicas mais eficazes na organização estudada, bem como em outras empresas e ambientes semelhantes.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como principal objetivo aplicar os algoritmos de Baldacci *et al.* (2004) e Bianchessia *et al.* (2017), com restrições exclusivas desse problema. Para isso, será realizado um caso prático para a roteirização de frota de uma empresa de monitoramento ambiental, otimizando as rotas e avaliando os tempos de serviço e quantidade de veículos utilizados.

1.2 Objetivos Específicos

1. Reescrever o algoritmo para atender as necessidades e restrições do problema;
2. Analisar os resultados gerados pelo programa, com diferentes quantidades de veículos;

3. Otimizar as rotas de forma a encontrar uma solução ótima, que atenda de forma satisfatória o número de veículos e quantidade de horas trabalhadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Logística

Desde a década de 1950, o transporte nacional vem adotando o modal rodoviário como principal forma de deslocamento o que se estende até a atualidade (IBGE, 2016). O transporte de carga no Brasil é realizado predominantemente através de rodovias, sendo concentrada principalmente na região Centro-sul (IBGE, 2014). Desta forma as empresas que apresentam atividades logísticas eficientes possuem grande diferencial, além de diminuir custos (GOMES, SANTOS, *et al.*, 2019)

Assim a logística é uma área importante para a indústria, pois envolve o gerenciamento eficiente do fluxo de bens e serviços, desde o ponto de origem até o ponto de consumo. Sendo assim, está intimamente ligada à eficiência do transporte de mercadorias em ambientes urbanos, e a aplicação de algoritmos visa melhorar a eficiência operacional e econômica por meio da otimização do roteamento de veículos (SOUZA, BOERES e MORAES, 2023). O CVRP é um exemplo de um problema logístico que as empresas enfrentam ao planejar rotas de entrega eficientes (BALDACCI, HADJICONSTANTINO e MINGOZZI, 2004).

A programação desempenha um papel importante na logística moderna, com sistemas de gerenciamento de transporte, rastreamento de estoque e análise de dados ajudando as empresas a gerenciar suas operações de forma mais eficiente. A logística também se torna importante para o comércio eletrônico, onde a entrega rápida e confiável é essencial para a satisfação do cliente.

A principal parcela dos custos logísticos está atrelada ao transporte, e no modal rodoviário existem custos de gestão de transportes que devem ser considerados sendo eles os custos variáveis e os custos fixos (GOMES, SANTOS, *et al.*, 2019). Os custos fixos não iram variar com a quantidade de carga e são a depreciação do veículo, o salário, gastos com emplacamento, seguro e despesas administrativas (KLANN, CUNHA, *et al.*, 2010). Já os custos variáveis estão relacionados ao transporte de cada carga e incluem combustíveis, lubrificantes, pneus, pedágios e manutenções (KLANN, CUNHA, *et al.*, 2010).

Desta forma, a eficiência do transporte, através das melhores rotas, minimizando distância e tempo, pode reduzir custos e conseqüentemente obter melhoria na prestação de serviços (GOMES, SANTOS, *et al.*, 2019). Obtendo assim um diferencial competitivo além da redução do impacto ambiental, pois ao selecionar rotas mais eficientes é possível reduzir emissões de gases poluentes (KLANN, CUNHA, *et al.*, 2010).

2.2 Cadeia de Suprimentos

A cadeia de suprimentos pode ser definida como um sistema integrado de organizações, pessoas, atividades, informações e recursos envolvidos na movimentação e transformação de produtos e serviços, desde a matéria-prima até o consumidor final (ZHANG, CHEN, *et al.*, 2020). Sendo assim, inclui todas as etapas necessárias para atender às demandas dos clientes, desde a aquisição de matérias-primas, produção, armazenamento, distribuição até a entrega final (ZHANG, CHEN, *et al.*, 2020).

No contexto do CVRP, a gestão da cadeia de suprimentos envolve a otimização do transporte de mercadorias para clientes, visando minimizar custos e otimizar as rotas de entrega (SOUZA, BOERES e MORAES, 2023). A aplicação de algoritmos visa melhorar a eficiência operacional e econômica da cadeia de suprimentos, por meio da otimização do roteamento de veículos. Além disso, a gestão da cadeia de suprimentos também envolve a coordenação entre os diferentes agentes envolvidos no processo, como fornecedores, fabricantes, distribuidores e varejistas (SOUZA, BOERES e MORAES, 2023). A otimização do transporte de mercadorias pode contribuir para a melhoria da coordenação entre esses agentes, reduzindo os custos e melhorando a eficiência da cadeia de suprimentos como um todo (SOUZA, BOERES e MORAES, 2023).

Baldacci *et al.* (2004), descreve um algoritmo exato para o CVRP, o que pode ter implicações significativas para a gestão da cadeia de suprimentos. Assim, ao utilizar técnicas avançadas de otimização, as empresas podem melhorar a eficiência de suas operações logísticas, reduzir custos de transporte e armazenamento, e garantir a satisfação do cliente por meio de entregas pontuais.

2.3 Algoritmo *Branch-and-cut*

Desde a década de 1980, o problema de orientação (OP) tem sido reconhecido como um desafio proeminente dentro do domínio do roteamento. O objetivo do OP reside na busca por um ciclo, dentro de um grafo completo ponderado com os lucros dos vértices associados. O propósito principal é otimizar a seleção dos vértices de maneira que a soma dos lucros dos vértices no ciclo seja maximizada e seu comprimento total seja menor ou igual a determinada constante. Desta forma, pode-se ver o OP como uma combinação do Problema de Mochila e do Problema do Caixeiro Viajante (KOBEGA, ROJAS-DELGADO, *et al.*, 2023). A Figura 1 apresenta um esquema de como o algoritmo trabalha.

Figura 1 - Algoritmo *Branch-and-cut*



Fonte: elaborado pelo autor

O algoritmo *Branch-and-Cut* é uma técnica de otimização combinatória. O algoritmo começa com a Inicialização formulação do problema de programação inteira e a criação de um nó raiz. Após vem a fase Ramificação o nó raiz é avaliado e, se não for possível obter uma solução inteira, o algoritmo seleciona uma variável inteira fracionária para ramificar. Isso significa que a variável é fixada em duas partes (0 e 1)

e dois novos nós são criados para explorar essas ramificações. Em seguida os Cortes, durante a resolução de cada nó, são aplicados cortes para restringir o espaço de busca e melhorar a eficiência do algoritmo. Os cortes podem ser desigualdades válidas que eliminam soluções fracas ou redundantes. A seguir a Resolução dos Subproblemas, para cada nó criado, o algoritmo resolve o subproblema associado para encontrar a melhor solução possível. Após a Atualização dos Limites, os limites superiores e inferiores são atualizados com base nas soluções encontradas nos subproblemas. E por fim, os Critérios de Parada, onde o algoritmo continua ramificando e resolvendo os subproblemas até que um critério de parada seja atendido, como encontrar a solução ótima ou atingir um limite de tempo (KOBEGA, ROJAS-DELGADO, *et al.*, 2023).

Assim, o *Branch-and-cut* é um procedimento de programação linear inteira, que se destaca por sua natureza exata. Originalmente, ele foi aplicado com o intuito de solucionar o Problema do Caixeiro Viajante. A base desse algoritmo envolve a relaxação linear do problema em questão, seguida pela aplicação de restrições adicionais que são reconhecidas como desigualdades válidas para a formulação em análise (SOUSA e ASADA, 2012).

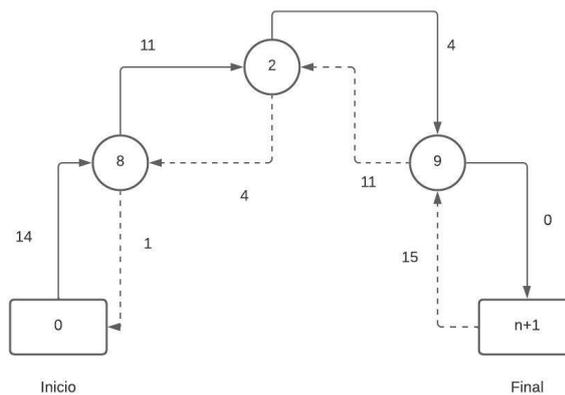
Desta forma os algoritmos *Branch-and-cut*, têm como principal objetivo resolver problemas de otimização, sendo por exemplo a minimização dos custos globais de roteamento, ao mesmo tempo em que asseguram o cumprimento das restrições cruciais, tais como janelas de tempo e restrições de capacidade e tempo de viagem. Para atingir essa meta, esses algoritmos empregam diversas abordagens que visam aprimorar a precisão e a eficiência da resolução de problemas complexos. Assim, várias formulações de modelos e desigualdades válidas são propostas, como *branch-and-cut-and-price* (SCHULZ e PFEIFFER, 2023).

2.4 Algoritmo de Baldacci

Tendo em vista o CVRP como um clássico desafio de otimização, a pesquisa de Baldacci *et al.* (2004), proporciona uma análise aprofundada do problema, fornecendo uma metodologia que facilita a compreensão e a resolução eficiente deste tipo de situação logística. Em seu trabalho Baldacci *et al.* (2004), é compreende o CVRP. Nesse cenário, é considerado uma frota de veículos de capacidade uniforme, e o

objetivo é atender clientes com demandas previamente conhecidas, buscando minimizar os custos totais de roteamento, conforme exemplificado na Figura 2, a figura apresenta a ida na seta cheia e a volta na seta pontilhada, sendo cada círculo uma empresa atendida.

Figura 2 - Caminho para uma rota de três clientes



Fonte: Adaptado (BALDACCI, HADJICONSTANTINO e MINGOZZI, 2004).

Nesse contexto, o trabalho de Baldacci *et al.* (2004) assume uma abordagem que se apoia em duas categorias distintas de mercadorias. Isso levou à execução de uma formulação inédita do problema CVRP, utilizando programação inteira. A partir dessa nova perspectiva, o autor derivou um limite inferior revisado. Esse valor limite foi então comparado com os resultados apresentados na literatura já estabelecida. A análise dessa comparação de maneira eficaz demonstrou a eficiência do método proposto por Baldacci. Através desse refinamento da abordagem do CVRP, o estudo trouxe uma valiosa contribuição para o campo da otimização logística, destacando a viabilidade e o mérito da nova arquitetura planejada (BALDACCI, HADJICONSTANTINO e MINGOZZI, 2004).

Assim, Baldacci *et al.* (2004), desenvolveu um novo algoritmo *branch-and-cut* incorporando o novo limite inferior obtendo-se uma solução ótima do CVRP. Através da experimentação computacional com problemas apresentados na literatura já estabelecida, o autor obteve sucesso no desempenho do código (BALDACCI, HADJICONSTANTINO e MINGOZZI, 2004).

2.5 Algoritmo de Bianchessia

Em seu trabalho, Bianchessia *et al.* (2017), apresenta uma nova formulação compacta, que reforçada por restrições de conectividade visa resolver o problema de orientação por equipe. Essa problemática, tem como objetivo maximizar o lucro total gerado por uma frota de veículos, sendo crucial que não se deve exceder o limite de tempo. Desta forma, as tarefas são caracterizadas por duas métricas, sendo elas: uma data de liberação e um tempo de vencimento, que devem ser processados em uma única máquina (BIANCHESSIA, MANSINI e SPERANZA, 2017).

Desta forma assim como Baldacci *et al.* (2004), o trabalho de Bianchessia *et al.* (2017), desenvolveu um algoritmo *branch-and-cut*. A implementação desse algoritmo foi realizada utilizando a linguagem de programação C++. Contudo, a diferença entre os autores se dá pois Bianchessia *et al.* (2017), introduziu restrições de conectividade. Essa formulação utilizando a introdução de restrições de conectividade, mostrou-se eficaz. Quando os resultados obtidos foram confrontados com métodos previamente propostos obteve-se uma solução promissora (BIANCHESSIA, MANSINI e SPERANZA, 2017).

2.6 Grupo Aqua Brasil

O grupo Aqua Brasil, fundado em 1991, tem sede localizada na cidade de João Monlevade – MG, Figura 3. Possui atuação na área de monitoramento ambiental, oferecendo aos seus clientes diversos serviços em todo o estado de Minas Gerais. O grupo Aqua é comprometido em oferecer as mais completas soluções em monitoramento ambiental para a indústria e o setor público. Identificando, analisando e apresentando resultados práticos que trarão ganhos na eficiência e na redução de custos para os clientes (AQUA, 2019).

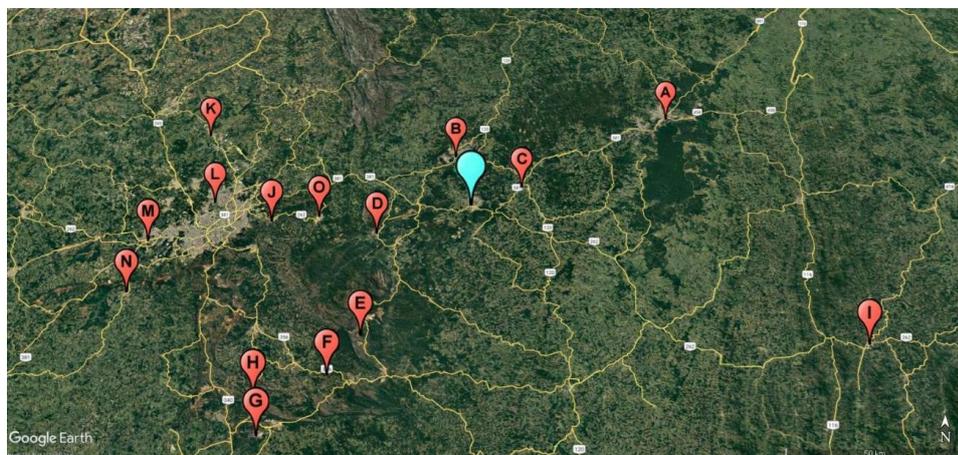
Figura 3 - Sede Grupo Aqua Brasil



Fonte: Grupo Aqua Brasil (2023).

Atualmente o grupo oferece os seguintes serviços: monitoramentos hídricos, da qualidade do ar, atmosférico, e de ruído, determinação de opacidade, caracterização de resíduos, ensaios físico-químico, vibração, tratamentos de águas e efluentes e estudos de dispersão. E atende as seguintes cidades: João Monlevade (ponto azul), Timoteo (A), Itabira (B), Nova Era (C), Barão de Cocais (D), Mariana (E), Ouro Preto (F), Ouro Branco (G e H), Manhuaçu (I), Sabará (J), Matozinhos (K), Ribeirão das Neves (L), Betim (M), Brumadinho (N), Caeté (O), e todas no estado de Minas Gerais, conforme demonstrado na Figura 4.

Figura 4: Mapa das cidades atendidas pelo Grupo Aqua Brasil



Fonte: Google Earth (2023).

Assim, um dos maiores desafios enfrentados pelo grupo é a otimização da rota, para que seja possível atender com excelência e agilidade todos os seus clientes. Desta forma, é necessária uma análise de possíveis cenários de quantas e quais empresas seriam atendidas a cada rota, analisando tempo de deslocamento e de cada serviço.

3 METODOLOGIA

O método científico é uma ferramenta fundamental que organiza o pensamento em um sistema e traça os procedimentos para alcançar objetivos pré-estabelecidos. Sendo assim a aplicação do método científico não se limita à ciência, mas também pode ser aplicada para resolver problemas cotidianos. Assim, pode-se definir a metodologia de pesquisa como um conjunto de procedimentos adotados com o propósito de atingir conhecimento (PRODANOV e FREITAS, 2013).

3.1 Classificação da Pesquisa

Ao se tratar da natureza, esta pesquisa se classifica como aplicada. Uma vez que, este método de pesquisa é voltado a geração de conhecimentos necessários para aplicação prática dirigida à solução de um problema específico (GIL, 2017).

Quanto a abordagem da pesquisa, a mesma pode ser definida como qualitativa. Assim, a pesquisa qualitativa possui o ambiente como fonte direta dos dados.

Os dados coletados nessas pesquisas são descritivos, retratando o maior número possível de elementos existentes na realidade estudada. Preocupa-se muito mais com o processo do que com o produto. Na análise dos dados coletados, não há preocupação em comprovar hipóteses previamente estabelecidas, porém estas não eliminam a existência de um quadro teórico que direcione a coleta, a análise e a interpretação dos dados (PRODANOV e FREITAS, 2013, p. 70).

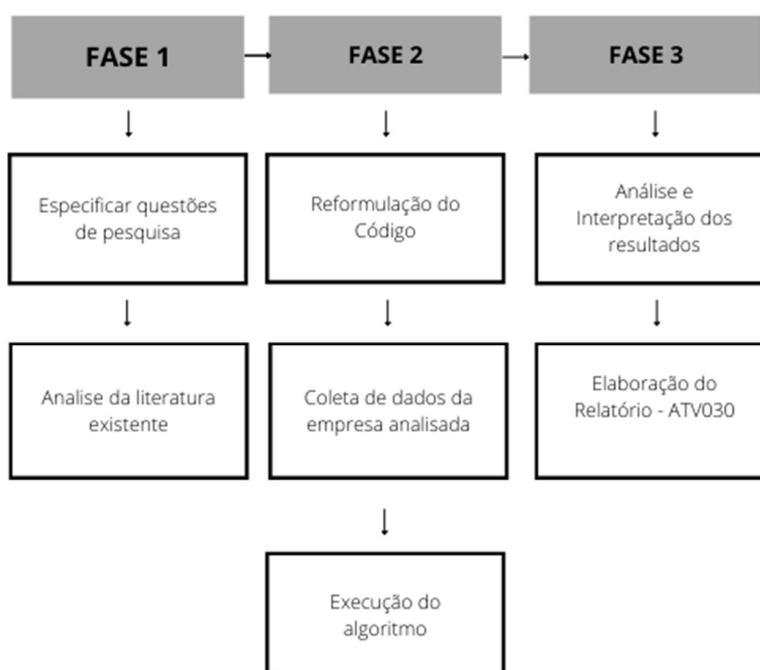
Quanto aos objetivos, a pesquisa se classifica como exploratória. Desta forma, proporcionando mais informações sobre o assunto estudado, contribuindo com hipóteses. Possui um planejamento que tende a ser flexível, considerando os mais variados aspectos do tema estudado (PRODANOV e FREITAS, 2013).

Já quanto aos procedimentos técnicos, forma pela qual adquirimos os dados necessários para a elaboração da pesquisa, inicialmente será realizada uma pesquisa bibliográfica e, posteriormente, um estudo de caso. A pesquisa bibliográfica contou com o levantamento de artigos e pesquisas sobre a solução específica do problema. Já o estudo de caso, consistirá na coleta e análise de dados de uma determinada empresa, buscando amplo e detalhado conhecimento de seus objetivos (PRODANOV e FREITAS, 2013).

3.2 Coleta e Análise dos Dados

Com o intuito de alcançar os objetivos, a pesquisa contou com uma revisão bibliográfica. Para busca de materiais foi utilizado o banco de dados da *ScienceDirect* e *Google Scholar*. Para esta pesquisa, foram utilizados artigos científicos completos, sem levar em consideração o fator de impacto, trabalhos publicados em eventos, dissertações e teses. A Figura 5 apresenta os passos seguidos para a realização deste trabalho.

Figura 5 - Fluxograma da metodologia adotada



Fonte: elaborado pelo autor

Para identificar características do objeto de estudo, foram coletados os dados do Grupo Aqua Brasil. Assim, selecionou-se clientes que possuem contratos fixos mensais, de um mesmo tipo de monitoramento ambiental. Sendo que os clientes estão alocados em diferentes cidades do estado de Minas Gerais. A partir desta listagem foram coletadas as longitudes e latitudes de cada empresa. Outro fator levantado foi o tempo de execução de cada serviço prestado e as distancias das empresas entre si e entre a sede do grupo. As latitudes e longitudes para a análise dos dados foram coletadas através do aplicativo *Google Earth*. Já o tempo de cada serviço prestado,

os dados foram coletados com relatos das equipes atuais do Grupo Aqua Brasil. A empresa possui disponíveis 16 equipes para atender todas as empresas listadas, não sendo necessário aplicar a capacidade de carga.

Tabela 1 - Banco de dados principal

| | Latitude | Longitude | Tempo de execução da atividade (h) |
|--------------|-----------------|------------------|---|
| Empresa 01 | -19,5859 | -43,0324 | 2,00 |
| Empresa 02 | -19,9386 | -43,4804 | 1,50 |
| Empresa 03 | -20,4016 | -43,1194 | 0,50 |
| Empresa 04 | -20,4583 | -43,7508 | 0,75 |
| Empresa 05 | -20,3763 | -43,6238 | 0,50 |
| Empresa 06 | -20,3226 | -43,6965 | 0,50 |
| Empresa 07 | -20,5379 | -43,7486 | 0,75 |
| Empresa 08 | -20,5381 | -43,5381 | 0,75 |
| Empresa 09 | -19,5271 | -44,0906 | 1,50 |
| Empresa 10 | -19,9662 | -44,0768 | 2,00 |
| Empresa 11 | -20,0049 | -44,1498 | 1,50 |
| Empresa 12 | -19,7456 | -43,7456 | 2,00 |
| Empresa 13 | -20,0127 | -43,5733 | 3,00 |
| Empresa 14 | -19,8305 | -19,1883 | 0,50 |
| Empresa 15 | -19,6833 | -43,2163 | 1,00 |
| Empresa 16 | -19,8871 | -43,4375 | 3,00 |
| Empresa 17 | -19,5291 | -42,5291 | 1,50 |
| Empresa 18 | -19,8711 | -43,3984 | 0,50 |
| Empresa 19 | -20,2771 | -43,4908 | 0,50 |
| Empresa 20 | -19,8228 | -44,0144 | 2,00 |
| Empresa 21 | -19,8079 | -43,3514 | 1,50 |
| Empresa 22 | -19,8405 | -43,1791 | 1,00 |
| Empresa 23 | -19,9501 | -44,1553 | 1,00 |
| Empresa 24 | -19,9344 | -43,8831 | 0,50 |
| Empresa 25 | -19,1628 | -42,2463 | 2,00 |
| Empresa 26 | -20,2587 | -43,5163 | 0,50 |
| Empresa 27 | -20,2081 | -43,6064 | 0,50 |
| Empresa 28 | -19,8625 | -43,7599 | 0,50 |
| Empresa 29 | -20,1375 | -44,2236 | 0,50 |
| Empresa 30 | -19,822 | -43,6929 | 0,50 |
| Empresa Sede | -19,8344 | -43,1897 | - |

Fonte: elaborado pelo autor.

A análise dos dados foi conduzida com base na implementação do modelo de Baldacci *et al.* (2004) e Bianchessia *et al.* (2017). Nesse contexto, o algoritmo e suas restrições foram personalizados de acordo com as necessidades do grupo de estudo. Para a execução do algoritmo, foi utilizada a plataforma *online Pifop*. Após a implementação, foram realizados testes em diversos cenários, variando as horas disponíveis para deslocamento e execução dos serviços a partir da restrição do tempo máximo de validade das amostras coletadas, com o objetivo de encontrar uma solução ótima. Além disso, foi feita uma comparação entre os tempos totais de serviço e a quantidade de equipe necessária.

A seguir é apresentado o modelo matemático do problema de roteamento de veículos com janelas de tempo, capacidade e custo fixo, em que o código implementado se baseia.

Conjuntos e Parâmetros:

N: Conjunto de nós, incluindo o depósito e os clientes;

A: Conjunto de arcos entre os nós;

q_i : Demanda do cliente i ;

Q: Capacidade do veículo;

T: Tempo de trabalho disponível.

Variáveis de Decisão:

x_{ij} : Variável binária que indica se o arco (i,j) é percorrido por algum veículo;

f_{ij} : Quantidade de carga levada por um veículo no arco (i,j) ;

y_{ij} : Tempo de viagem cumulativo de um veículo no arco (i,j) .

Objetivo:

$$\text{minimizar } \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \cdot x_{ij}$$

Restrições:

Cada cliente é visitado exatamente uma vez:

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N$$

Cada cliente é atendido exatamente uma vez:

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N$$

Conservação de carga:

$$\sum_{(i,j) \in A} (f_{ji} - f_{ij}) = 2 \cdot q_i \quad \forall j \in N \setminus \{0\}$$

Carga total saindo do depósito:

$$\sum_{j \in N} f_{0j} = \sum_{i \in N} q_i$$

Carga total chegando ao depósito:

$$\sum_{i \in N} f_{i0} = Q \cdot \sum_{j \in N} x_{0j} - \sum_{i \in N} q_i$$

Carga total chegando ao depósito cópia:

$$\sum_{i \in N} f_{i(n+1)} = 0$$

Carga total saindo do depósito cópia:

$$\sum_{j \in N} f_{(n+1)j} = Q \cdot \sum_{j \in N} x_{0j}$$

Consistência entre carga e variáveis binárias:

$$f_{ij} + f_{ji} = Q \cdot (x_{ij} + x_{ji}) \quad \forall (i, j) \in A$$

Restrição de corte para tempo de trabalho:

$$\sum_{j \in N} x_{0j} \geq \left\lceil \frac{41,75}{T} \right\rceil$$

Restrições adicionais (Bianchesi):

Tempo de viagem do depósito ao cliente:

$$y_{0j} = c_{0j} \cdot x_{0j} \quad \forall j \in N$$

Tempo de viagem do cliente i ao j é maior ou igual ao tempo de viagem do depósito ao j:

$$y_{ij} \geq c_{0j} \cdot x_{ij} \quad \forall (i,j) \in A, j \in N$$

Tempo de viagem de i a j é menor ou igual ao tempo de trabalho disponível:

$$y_{ij} \leq T \cdot x_{ij} \quad \forall (i,j) \in A$$

Conservação do tempo de viagem:

$$\sum_{(i,j) \in A} y_{ij} + \sum_{(j,i) \in A} c_{ji} \cdot x_{ji} = \sum_{(j,i) \in A} y_{ji} \quad \forall j \in N$$

A primeira etapa do algoritmo implementado descreve os parâmetros utilizados como demonstrado na Figura 6 e é implementado o fator de correção de 2,2 que é uma relação dos valores de distância reais retirados do *Google Maps* e a distância a partir das coordenadas em linha reta, em relação ao tempo.

Figura 6 - Parâmetros do algoritmo

```

1
2 param n ; # default 30;
3 set C := {1..n};
4 param depot := 0;
5 param depotcopy := n+1;
6
7 set D := {depot, depotcopy};
8 set N := {depot} union C union {depotcopy} ;
9
10 param fc default 0; # custo fixo para ativar a equipe
11
12 set A := {(i,j) in {N,N}: i != j} diff {(depot,depotcopy),(depotcopy,depot)};
13
14 param cx{i in N} ; # default if i in D then 50 else Uniform(0,100);
15 param cy{i in N} ; # default if i in D then 50 else Uniform(0,100);
16
17 param _t {i in N} ; # default round ( Uniform ( 1, 5 ) );
18
19 param c{(i,j) in A} := _t[i] + 2.2 * (sqrt( ((cx[i] - cx[j])*111.1)^2 + ((cy[i] - cy[j])*96.2)^2)/50) + if i == depot then fc else 0;
20
21 param q {i in N} default 1 ; # default round ( Uniform ( 1, 5 ) );
22
23 param tq := sum {i in C} q[i];
24
25 param Q default card(N);
26
27 param T default 15; # tempo de trabalho disponível a cada 48 horas.
28

```

Fonte: PINHEIRO, JUNIOR E CARMAGO (2023).

Onde:

n = Número de clientes;

C = Conjunto de clientes;

depot = Nó do depósito;

depotcopy = Cópia do nó do depósito;

D = Conjunto incluindo o depósito e depotcopy;

N = Conjunto incluindo o depósito, clientes e depotcopy;

fc = Custo fixo para ativar a equipe;

A = Conjunto de arcos entre nós;

cx, cy = Coordenadas dos nós;

_t = Parâmetro relacionado ao tempo;

c = Custo de viagem entre nós;

q = Demanda de cada nó;

tq = Demanda total dos clientes;

Q = Número de veículos;

T = Tempo disponível para trabalho a cada 48 horas.

A segunda etapa do algoritmo implementado descreve as variáveis utilizadas como demonstrado na Figura 7.

Figura 7 - Variáveis do algoritmo

```

29 #=====
30 # variables
31 #=====
32 var x{(i,j) in A}, binary; # if node j is visited imediatly after node i
33
34 var f{(i,j) in A}, >= 0 ; # load being carried by a vehicle on arc (i,j)
35
36 var y{(i,j) in A}, >= 0 ; # cumulative travel time of a vehicle on arc (i,j)
37
38 #var M >=0, integer ;
39

```

Fonte: PINHEIRO, JUNIOR E CARMAGO (2023).

Onde:

x = Variável de decisão binária indicando se um arco é utilizado;

F = Carga transportada por um veículo em cada arco;

y = Tempo de viagem cumulativo em cada arco.

A terceira etapa do algoritmo implementado utiliza os princípios do algoritmo de Baldacci *et al.* (2004) para montar a função objetivo, que visa minimizar o custo total das viagens, e as restrições personalizadas para o modelo de problema adotado, como demonstrado na Figura 8.

Figura 8 - Função objetivo para Baldacci *et al.* (2004)

```

40 #=====
41 # Baldacci
42 #=====
43
44 minimize of: sum {(i,j) in A} c[i,j] * x[i,j] ;
45
46 s.t. r1 { i in C } : sum{(i,j) in A} x[i,j] = 1;
47
48 s.t. r2 { j in C } : sum{(i,j) in A} x[i,j] = 1;
49
50 s.t. r3 { i in C } : sum{(i,j) in A} ( f[j,i] - f[i,j] ) = 2 * q[i] ;
51
52 s.t. r4 : sum {(depot,j) in A } f[depot,j] = sum {i in C} q[i];
53
54 s.t. r5 : sum {(i,depot) in A } f[i,depot] = Q * sum {(depot,j) in A} x[depot,j] - sum {i in C} q[i] ;
55
56 s.t. r6 : sum { (i,depotcopy) in A } f[i,depotcopy] = 0;
57
58 s.t. r7 : sum { (depotcopy,j) in A } f[depotcopy,j] = Q * sum {(depot,j) in A} x[depot,j];
59
60 s.t. r8 {(i,j) in A: i < j} : f[i,j] + f[j,i] = Q * (x[i,j] + x[j,i]) ;
61
62 s.t. cut: sum {(depot,j) in A} x[depot,j] >= ceil(41.75/T);
63
64

```

Fonte: PINHEIRO, JUNIOR E CARMAGO (2023).

Onde:

r1 e r2 = essas restrições garantem que cada cliente seja visitado exatamente uma vez;

r3 = essa restrição assegura que a quantidade de veículos que entra em um nó é igual à quantidade que sai;

r4 e r5 = essas restrições garantem que a carga total saindo e entrando no depósito seja igual à demanda total dos clientes;

r6 e r7 = essas restrições são relacionadas ao *depotcopy*, onde a r6 garante que nenhum veículo deixa a carga no *depotcopy*, enquanto a r7 assegura que a carga total saindo *depotcopy* seja planejada para atender à demanda total esperada pelos veículos que partem do depósito original;

r8 = essa restrição assegura que a carga total saindo e entrando em cada arco seja equilibrada;

cut = essa restrição de capacidade adicional, onde a soma das variáveis x saindo do depósito deve ser maior ou igual a um valor calculado com base em T (tempo disponível).

A quarta etapa do algoritmo implementado utiliza os princípios do algoritmo de Bianchesi *et al.* (2017) para controlar e limitar o tempo de viagem, como demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Restrições de tempo de viagem baseadas em Bianchesi *et al.* (2017)

```

65 #=====
66 # Bianchesi
67 #=====
68
69 s.t. r9 {(depot,j) in A}: y[depot,j] = c[depot,j] * x[depot,j] ;
70
71 s.t. r10 {(i,j) in A: j not in D}: y[i,j] >= c[depot,j] * x[i,j] ;
72
73 s.t. r11 {(i,j) in A}: y[i,j] <= T * x[i,j] ;
74
75 s.t. r12 {j in C}: sum { (i,j) in A } y[i,j] + sum {(j,i) in A} c[j,i] * x[j,i] = sum { (j,i) in A } y[j,i];
76

```

Fonte: PINHEIRO, JUNIOR E CARMAGO (2023).

Onde:

r9 a r12 = essas restrições são fundamentais para controlar e limitar o tempo de viagem cumulativo em diferentes arcos, garantindo que as variáveis de decisão binárias “x” e o custo de viagem “c” estejam corretamente relacionadas ao tempo cumulativo “y”.

Por fim a quinta etapa do algoritmo implementado são definições adicionais que organizam as informações específicas sobre as rotas, como demonstrado na Figura 10.

Figura 10 - Definições adicionais

```

77 # =====
78
79
80 set B within C ordered;
81 set R := {1..card(B)} ordered;
82 set routes{R} within N default {} ordered;
83 param u;
84 param k;
85 param routelen{R};
86 param routeload{R};
87 end;

```

Fonte: PINHEIRO, JUNIOR E CARMAGO (2023).

Onde:

set B within C ordered = Conjunto ordenado de clientes;

set R = Conjunto de rotas;

routes {R} within N default {} ordered = Conjunto de rotas, inicialmente vazio;

param u; param k; param routelen{R}; param routeload{R}; = Parâmetros adicionais relacionados às rotas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como demonstrado anteriormente problemas de roteirização de veículos, é uma das principais preocupações da logística empresarial. A fim de encontrar soluções para uma empresa de monitoramento ambiental implementou-se o algoritmo estudado em suas rotas. Para isso variou-se a carga horária da equipe como demonstrado na Tabela 2 e considerou a validade da amostra em 48 horas após a coleta.

Tabela 2 - Carga horária da equipe

| | Carga Horária Total da Equipe (H) | Carga Horária da equipe por dia (H) |
|---|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 12 | 6,0 |
| 2 | 13 | 6,5 |
| 3 | 14 | 7,0 |
| 4 | 15 | 7,5 |
| 5 | 16 | 8,0 |
| 6 | 17 | 8,5 |
| 7 | 18 | 9,0 |

Fonte: elaborado pelo autor.

Ao executar o algoritmo, levando em consideração apenas uma linha reta de ponta a ponta, desconsiderando relevo, curvas, obstáculos e desvios existentes nas autoestradas, obteve-se os resultados demonstrados na Tabela 3 a seguir. Sendo o Gap a porcentagem de incerteza do algoritmo.

Tabela 3 - Execução do algoritmo sem fator de correção

| Valor de T (H) | Tempo [s] | Gap [%] | Equipes |
|----------------|-----------|---------|---------|
| 12 | 111.92 | 2.59 | 5 |
| 13 | 111.64 | 4.16 | 5 |
| 14 | 112.29 | 2.61 | 4 |
| 15 | 112.05 | 3.47 | 4 |
| 16 | 115.36 | 2.79 | 4 |
| 17 | 115.69 | 2.94 | 4 |
| 18 | 58.29 | 1.00 | 3 |

Fonte: elaborado pelo autor.

Ao analisar a Tabela 3, é evidente que, no intervalo de 14 a 17 horas, o número de equipes permaneceu constante, tornando desnecessário estender a carga horária para 17 horas. Nesse contexto, optar por 14 horas mostra-se mais eficiente. O mesmo

padrão é observado ao analisar 12 e 13 horas, sugerindo que a carga horária mais adequada seria de 12 horas.

Além disso, nota-se uma redução no número de equipes necessárias ao adotar uma carga horária de 18 horas. Contudo, é crucial ressaltar que o aumento na carga horária pode ser justificado diante de imprevistos que possam surgir durante o trajeto. Ao analisar a coluna Gap, é possível observar um valor de confiança do algoritmo elevado, sendo o pior resultado de 95,84% e o melhor de 99% de confiança.

Ao levar em consideração os resultados referentes a cada equipe necessária para cada carga horária, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 4 e o mapa de rotas apresentado na Figura 11.

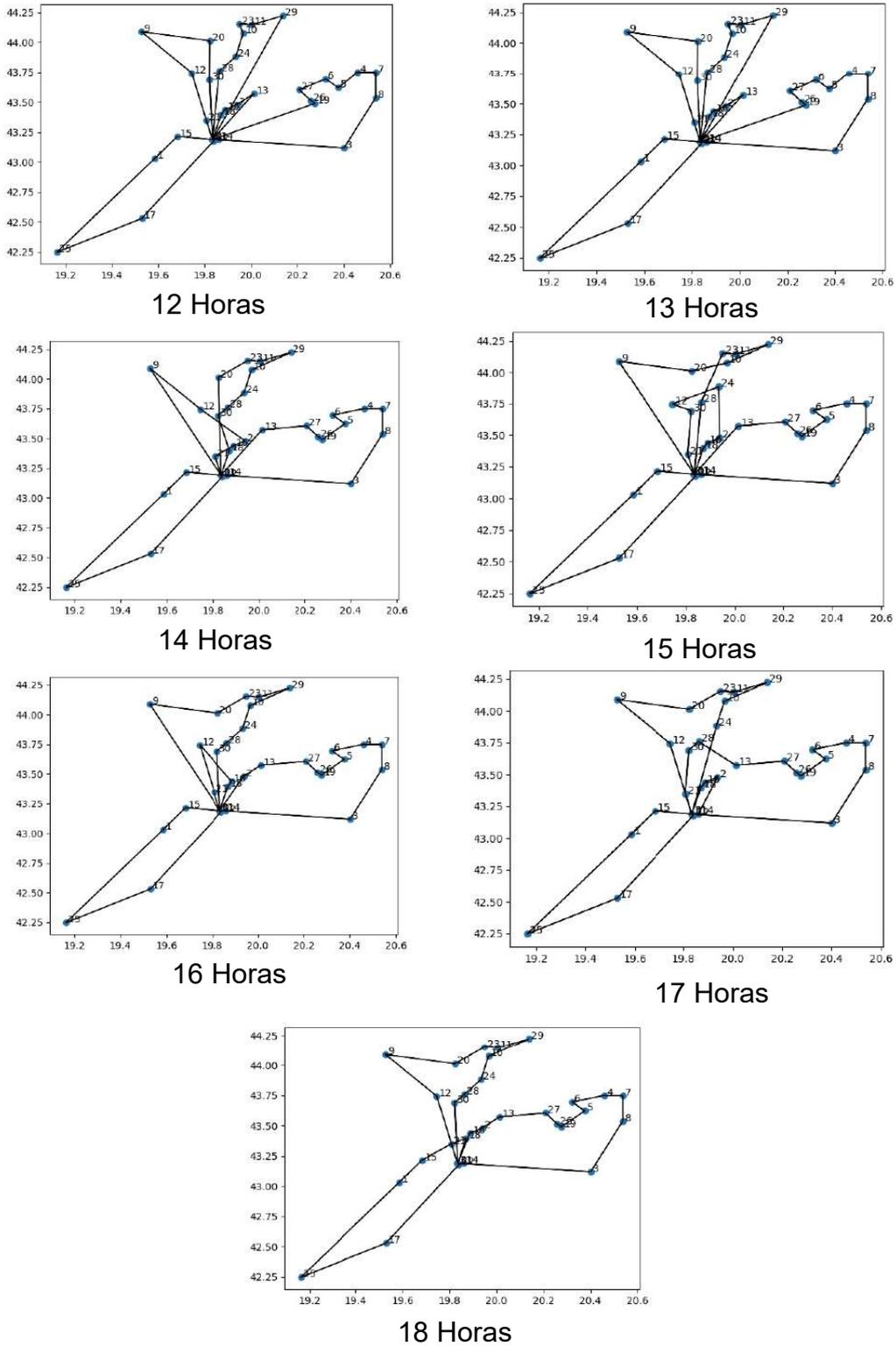
Tabela 4 - Resultados das equipes por carga horária sem fator de correção

| Carga Horária Total | Equipes | Horas Gastas por Equipe | % de Utilização do Tempo | Rota |
|----------------------------|----------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 12 | 1 | 9,71 | 80,96 | 0 13 2 16 18 31 |
| | 2 | 11,45 | 95,46 | 0 15 1 25 17 31 |
| | 3 | 11,68 | 97,36 | 0 22 14 3 8 7 4 5 6 27 26 19 31 |
| | 4 | 10,47 | 87,24 | 0 29 11 23 10 24 28 31 |
| | 5 | 11,67 | 97,25 | 0 30 20 9 12 21 31 |
| 13 | 1 | 9,71 | 74,73 | 0 13 2 16 18 31 |
| | 2 | 10,67 | 82,07 | 0 14 3 8 7 4 5 6 27 26 19 31 |
| | 3 | 11,67 | 89,77 | 0 21 12 9 20 30 31 |
| | 4 | 12,47 | 95,91 | 0 22 17 25 1 15 31 |
| | 5 | 10,47 | 80,53 | 0 29 11 23 10 24 28 31 |
| 14 | 1 | 13,85 | 98,91 | 0 14 3 8 7 4 6 5 19 26 27 13 31 |
| | 2 | 12,47 | 89,06 | 0 15 1 25 17 22 31 |
| | 3 | 13,71 | 97,94 | 0 20 23 11 29 10 24 28 30 18 31 |
| | 4 | 13,55 | 96,8 | 0 21 16 2 12 9 31 |
| 15 | 1 | 14,68 | 97,89 | 0 9 20 10 29 11 23 28 31 |
| | 2 | 13,85 | 92,32 | 0 13 27 26 19 5 6 4 7 8 3 14 31 |

| Carga Horária Total | Equipes | Horas Gastas por Equipe | % de Utilização do Tempo | Rota |
|----------------------------|----------------|--------------------------------|---------------------------------|---|
| | 3 | 12,47 | 83,12 | 0 15 1 25 17 22 31 |
| | 4 | 12,58 | 83,85 | 0 18 16 2 24 12 30 21 31 |
| 16 | 1 | 15,36 | 95,99 | 0 2 13 27 26 19 5 6 4 7 8 3 14 31 |
| | 2 | 15,64 | 97,76 | 0 9 20 23 11 29 10 24 28 30 31 |
| | 3 | 9,25 | 57,82 | 0 18 16 12 21 31 |
| | 4 | 12,47 | 77,93 | 0 22 17 25 1 15 31 |
| 17 | 1 | 12,47 | 73,34 | 0 15 1 25 17 22 31 |
| | 2 | 6,78 | 39,88 | 0 18 16 2 14 31 |
| | 3 | 16,63 | 97,84 | 0 21 30 28 13 27 26 19 5 6 4 7 8 3 31 |
| | 4 | 16,63 | 97,82 | 0 24 10 29 11 23 20 9 12 31 |
| 18 | 1 | 17,89 | 99,36 | 0 3 8 7 4 6 5 19 26 27 13 2 16 31 |
| | 2 | 17,69 | 98,27 | 0 12 9 20 23 11 29 10 24 28 30 31 |
| | 3 | 15,67 | 87,04 | 0 18 21 15 1 25 17 22 14 31 |

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 11 - Rota para cada carga horária



Fonte: elaborado pelo autor.

Ao analisar a distribuição do tempo para cada carga horária, torna-se evidente a diferença em relação a utilização do tempo. Ao comparar as cargas horárias de 12 e

13 horas, observa-se que a média de tempo ocioso é maior em 13 horas, devido à média de utilização do tempo de 84,60%, enquanto em 12 horas é de 91,65%.

Ao examinar as cargas horárias de 14 a 17 horas, nota-se que a média de tempo ocioso é mais elevada em 17 horas, com uma média de utilização do tempo de 77,22%, em comparação com 95,67% em 14 horas. Isso sugere que ao aumentar as horas mantendo o número de equipes, o valor de tempo ocioso aumenta conseqüentemente. Já a carga horária de 18 horas apresenta uma média de utilização do tempo de 94,89%.

Outro ponto importante a ser considerado são as horas totais gastas em cada carga horária, como demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Horas totais gastas

| Carga Horária Total | Horas Totais Gastas |
|---------------------|---------------------|
| 12 | 54,98 |
| 13 | 54,99 |
| 14 | 53,58 |
| 15 | 53,58 |
| 16 | 52,72 |
| 17 | 52,51 |
| 18 | 51,25 |

Fonte: elaborado pelo autor.

Assim, é evidente que à medida que se aumenta o número de equipes, o total de horas trabalhadas também aumenta. Essa tendência é principalmente atribuída ao aumento do número de saídas e retornos à sede da empresa. Isso sugere que, ao reduzir a quantidade de equipes sem comprometer o cronograma estipulado, é possível diminuir o total de horas trabalhadas ao final do processo.

Já ao executar o algoritmo, levando em consideração relevo, curvas, obstáculos e desvios existentes nas autoestradas, adotou-se um fator de correção de 2,2, que é uma relação dos valores de distância reais retirados do *Google Maps* e a distância a partir das coordenadas em linha reta, em relação ao tempo e obteve-se os resultados demonstrados na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 - Execução do algoritmo com fator de correção

| Valor de T | Tempo [s] | Gap [%] | Equipes |
|------------|-----------|---------|---------|
| 13 | 110.86 | 9.52 | 9 |
| 14 | 112.55 | 7.53 | 7 |
| 15 | 114.05 | 7.09 | 6 |
| 16 | 115.58 | 4.84 | 6 |
| 17 | 113.21 | 4.22 | 5 |
| 18 | 113.10 | 5.95 | 5 |

Fonte: elaborado pelo autor.

Ao analisar a Tabela 6, é visível a falta da carga horária de 12 horas. Isso ocorre devido a inviabilidade temporal, uma vez que é necessário visitar cada empresa e retornar a sede, excedendo a carga horária estipulada. Além disso, destaca-se o aumento na quantidade de equipes necessárias em cada carga horária, porém, é importante notar que o fator de correção contribui para que os resultados se aproximem da realidade.

Ao analisar a coluna Gap, é possível observar um valor de confiança do algoritmo elevado, porém menor que quando não se usou fator de correção, sendo o pior resultado de 90,48% e o melhor de 95,78% de confiança.

Ao levar em consideração os resultados referentes a cada equipe necessária para cada carga horária, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 7 e o mapa de rotas apresentado na Figura 12.

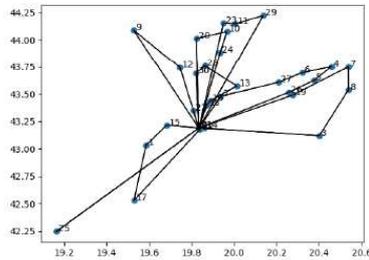
Tabela 7 - Resultados das equipes por carga horária com fator de correção

| Carga Horária Total | Equipes | Horas Gastas por Equipe | % de Utilização do Tempo | Rota |
|---------------------|---------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 13 | 1 | 12,28 | 94,45 | 0 2 27 6 4 5 26 31 |
| | 2 | 11,8 | 90,77 | 0 9 12 31 |
| | 3 | 12,51 | 96,2 | 0 15 1 17 22 31 |
| | 4 | 12,98 | 99,85 | 0 18 16 13 28 30 31 |
| | 5 | 12,76 | 98,18 | 0 19 7 8 3 14 31 |
| | 6 | 12,55 | 96,54 | 0 20 10 24 31 |
| | 7 | 2,89 | 22,26 | 0 21 31 |
| | 8 | 12,34 | 94,92 | 0 25 31 |
| | 9 | 12,83 | 97,96 | 0 29 11 23 31 |

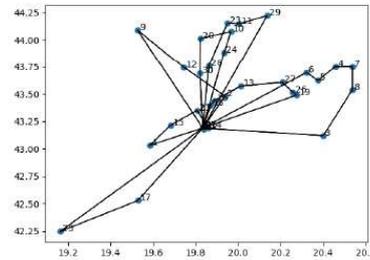
| Carga Horária Total | Equipes | Horas Gastas por Equipe | % de Utilização do Tempo | Rota |
|----------------------------|----------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 14 | 1 | 13,71 | 97,9 | 0 2 12 9 31 |
| | 2 | 14 | 99,98 | 0 3 8 7 4 5 6 31 |
| | 3 | 14 | 99,98 | 0 18 16 13 27 26 19 31 |
| | 4 | 10,03 | 71,64 | 0 22 14 21 15 1 31 |
| | 5 | 13,99 | 99,95 | 0 25 17 31 |
| | 6 | 13,25 | 94,67 | 0 29 11 23 28 31 |
| | 7 | 13,05 | 93,22 | 0 30 20 10 24 31 |
| 15 | 1 | 14,5 | 96,7 | 0 3 8 7 4 5 6 27 31 |
| | 2 | 14,81 | 98,72 | 0 18 16 2 13 26 19 31 |
| | 3 | 14,77 | 98,5 | 0 22 21 12 1 15 31 |
| | 4 | 14,68 | 97,85 | 0 25 17 14 31 |
| | 5 | 14,76 | 98,4 | 0 29 11 23 10 31 |
| | 6 | 14,46 | 96,43 | 0 30 28 24 20 9 31 |
| 16 | 1 | 6,04 | 37,78 | 0 1 15 31 |
| | 2 | 15,17 | 94,84 | 0 12 9 20 30 31 |
| | 3 | 15,6 | 97,48 | 0 21 18 16 2 13 27 31 |
| | 4 | 15,02 | 93,89 | 0 22 17 25 31 |
| | 5 | 15,7 | 98,1 | 0 26 19 5 6 4 7 8 3 14 31 |
| | 6 | 15,83 | 98,94 | 0 29 11 23 10 24 28 31 |
| 17 | 1 | 16,13 | 94,86 | 0 1 25 17 31 |
| | 2 | 16,57 | 97,48 | 0 14 3 8 7 4 5 6 27 26 19 31 |
| | 3 | 16,79 | 98,77 | 0 15 12 9 20 30 31 |
| | 4 | 14,02 | 82,47 | 0 22 21 16 2 13 31 |
| | 5 | 16,35 | 96,15 | 0 29 11 23 10 24 28 18 31 |
| 18 | 1 | 11,27 | 62,6 | 0 13 2 16 31 |
| | 2 | 17,4 | 96,67 | 0 15 1 25 17 31 |
| | 3 | 17,25 | 95,86 | 0 21 12 9 20 28 30 31 |
| | 4 | 17,6 | 97,8 | 0 22 14 3 8 7 4 5 6 27 26 19 31 |
| | 5 | 15,76 | 87,56 | 0 29 11 23 10 24 18 31 |

Fonte: elaborado pelo autor.

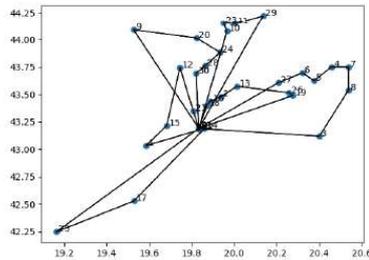
Figura 12 - Rota para cada carga horária com fator de correção



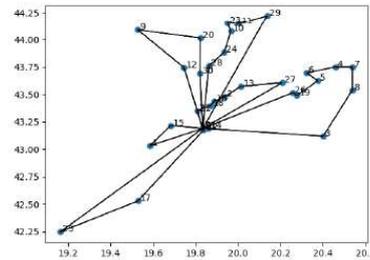
13 horas



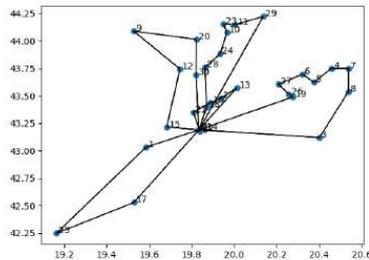
14 horas



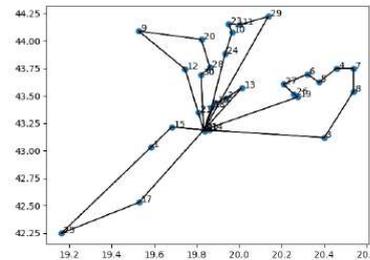
15 horas



16 horas



17 horas



18 horas

Fonte: elaborado pelo autor.

Ao comparar as cargas horárias de 13 e 18 horas, observa-se que a necessidade de equipes quase que dobrou devido ao aumento do tempo de deslocamento, considerando o fator de correção, mas mantendo o tempo de execução constante. Um ponto crucial a ser considerado é que, com 13 horas, duas equipes foram alocadas para atender uma única empresa cada. Em uma dessas empresas, a equipe enfrentou um tempo ocioso significativo de 77,74%, enquanto a outra equipe teve um tempo

ocioso baixo. Isso ocorreu porque a segunda empresa estava mais distante, tornando inviável a carga horária de 12 horas, uma vez que foram necessárias 12,34 horas para o deslocamento e execução do monitoramento.

Ao analisar as cargas horárias de 17 e 18 horas, observa-se que a média de tempo ocioso é mais alta em 18 horas, registrando uma utilização do tempo de 88,09%, em comparação com 93,94% em 17 horas. Isso indica que ao aumentar as horas mantendo o número de equipes, o valor de tempo ocioso aumenta conseqüentemente. Ou seja, a utilização das 18 horas no cenário sem fator de correção é mais vantajosa do que no cenário em que o fator de correção foi considerado.

Outro ponto importante a ser considerado são as horas totais gastas em cada carga horária, como demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Horas totais gastas com fator de correção

| Carga Horária Total | Horas Totais Gastas |
|---------------------|---------------------|
| 13 | 102,94 |
| 14 | 92,03 |
| 15 | 87,98 |
| 16 | 83,36 |
| 17 | 79,86 |
| 18 | 79,28 |

Fonte: elaborado pelo autor.

Assim, como no cenário sem fator de correção, é visível que ao aumentar a quantidade de equipes também se aumenta o total de horas gastas. Isso demonstra que o aumento da carga horária, reduz o número de equipes necessárias e o a quantidade de horas gastas, sem comprometer o cronograma.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou um problema de logística clássica, o roteamento de veículos. Para a análise do problema, empregou-se um algoritmo que analisou dois possíveis cenários: o primeiro sem considerar o fator de correção das autoestradas e o segundo considerando o fator de correção.

O algoritmo utilizado foi construído com base no trabalho de Baldacci *et al.* (2004) e Bianchessia *et al.* (2017). Por meio desse método, foi possível otimizar as rotas de uma empresa de monitoramento ambiental. A análise observou que, para cargas horárias com o mesmo número de equipes trabalhando, optar pela menor carga horária é mais vantajoso. No cenário sem fator de correção, a carga horária de 18 horas é favorável devido ao menor número de equipes, enquanto, ao adotar o fator de correção é mais vantajoso a utilização da carga horária de 17 horas, por ter um menor tempo ocioso.

Por fim, o trabalho também destacou a importância do fator de correção para a análise, uma vez que se aproxima mais da realidade, evidenciando sua relevância para a tomada de decisões. Ademais, também se percebe a necessidade de estudos futuros que visam contemplar a utilização de horas extras, analisando se é melhor optar por horas extras ou contratação de novas equipes, outra limitação encontrada seria a implementação de um algoritmo adicional que busque as distâncias automaticamente no *Google Maps*. No presente trabalho não foi utilizado a capacidade da frota de veículos pois pelo tipo de atividade seria possível executar com o mesmo tipo de veículo.

REFERÊNCIAS

ACHUTHA, N.R.; CACETTA, L.; HILL, S.P. **On the vehicle routing problem**. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 30, Dezembro 1997. 4277-4288.

ALTABEEB, Asma M. et al. **Solving capacitated vehicle routing problem using cooperative firefly algorithm**. *Applied Soft Computing*, 2021.

AQUA. **Sobre nós**. Grupo Aqua Brasil, 2019. Disponível em: <<https://grupoaquabrasil.com.br/>>. Acesso em: 19 Julho 2023.

ARPINI, Bianca P.; ROSA, Rodrigo A. **Uma revisão sistemática da literatura sobre o Problema de Roteirização de Veículos Capacitados com Restrições de Carregamento Bidimensional (2L-CVRP)**. *Transportes*, 25, 2017. 61 - 72.

BALDACCI, R.; HADJICONSTANTINOU, E.; MINGOZZI, A. **An Exact Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem Based on a Two-Commodity Network Flow Formulation**. *Operations Research*, 52, September–October 2004. 723–738.

BARANWAL, Mayank et al. **Vehicle Routing Problem with Time Windows: A Deterministic Annealing approach**. American Control Conference (ACC). Boston: [s.n.]. 2016.

BIANCHESSIA, Nicola; MANSINI, Renata; SPERANZA, M. G. **A branch-and-cut algorithm for the Team Orienteering Problem**. *INTERNATIONAL TRANSACTIONS IN OPERATIONAL RESEARCH*, 2017. 627-635.

BRANQUINHO, H.M. **ESTUDO DA VIABILIDADE FINANCEIRA DE UMA CONSTRUTORA DE EDIFÍCIOS**. Universidade Federal de Ouro Preto (Trabalho de Conclusão de Curso). Ouro Preto, p. 52. 2020.

GIL, Antonio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed.

GOMES, Jaísa A. C. et al. **Aplicação de ferramenta computacional na otimização e mitigação de custos na roteirização da logística de transporte de cargas**. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, 5, Julho 2019. 7703-7716.

IBGE. **Logística dos Transportes no Brasil**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. [S.I.]. 2014.

IBGE. **Redes e Fluxos do Território Ligações Rodoviárias e Hidroviárias 2016**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro. 2016.

IORI, Manuel; MARTELLO, Silvano. **Review an Annotated Bibliography of Combined Routing and Loading Problems**. Yugoslav Journal of Operations Research, 2013. 311-326.

JUNIOR, Carlos A. D. M. et al. **O papel da roteirização na redução de custos logísticos e melhoria do nível de serviço em uma empresa do segmento alimentício no Ceará**. XX Congresso Brasileiro de Custos, Uberlândia, 18 a 20 novembro 2013.

KLANN, Roberto C. et al. **Utilização da Programação Linear na Otimização de Resultados de uma Empresa do Ramo de Transporte Rodoviário de Cargas**. Associação Brasileira de Custos, 5, 2010.

KOBEAGA, Gorka et al. **A revisited branch-and-cut algorithm for large-scale orienteering problems**. European Journal of Operational Research, 31 Julho 2023.

PRAVEEN, V. et al. **Vehicle Routing Optimization Problem: A Study on Capacitated Vehicle Routing Problem**. Materials Today: Proceedings, 64, n. Part 1, 2022. 670-674.

PRODANOV, Cleber C.; FREITAS, Ernani C. D. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2ª. ed.

SCHULZ, Arne; PFEIFFER, Christian. **Using fixed paths to improve branch-and-cut algorithms for precedence-constrained routing problems**. European Journal of Operational Research, 2023.

SOUSA, Aldir S.; ASADA, Eduardo N. **Uma nova abordagem branch and cut aplicada ao problema de planejamento da expansão de redes de transmissão de grande porte**. Revista Controle & Automação, Fevereiro 2012.

SOUZA, Israel P.; BOERES, Maria C. S.; MORAES, Renato E. N. **A robust algorithm based on Differential Evolution with local search for the Capacitated Vehicle Routing Problem**. Swarm and Evolutionary Computation, 77, 2023.

ZHANG, Wenyu et al. **Composite multi-objective optimization on a new collaborative vehicle routing problem with shared carriers and depots.** Journal of Cleaner Production, 274, 2020.