

ROBERTO LOPES BATISTA

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS BASEADO EM
GEORREFERENCIAMENTO E ALGORITMO GENÉTICO**

**MANAUS – AM
2022**

ROBERTO LOPES BATISTA

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS BASEADO EM
GEORREFERENCIAMENTO E ALGORITMO GENÉTICO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental - PPG.EGPSA, do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia- ITEGAM, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Profa. Dra. Iracyanne Retto Uhlmann

**MANAUS – AM
2022**

ROBERTO LOPES BATISTA

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS BASEADA
EM GEORREFERENCIAMENTO E ALGORITMO GENÉTICO**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do título de Mestre do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia – ITEGAM.

Manaus-AM, 15 de agosto de 2022.



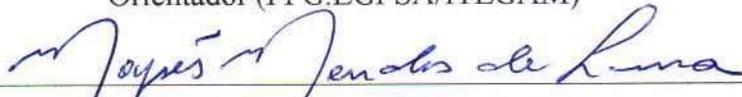
Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite

Coordenador do PPG.EGPSA - ITEGAM

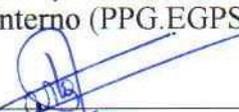
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. IRACYANNE RETTO UHLMANN
Orientador (PPG.EGPSA/ITEGAM)



Prof. Dr. MOYSES MENDES DE LIMA
Examinador Interno (PPG.EGPSA/ITEGAM)



Prof. Dr. CARLOS ALBERTO OLIVEIRA DE FREITAS
Examinador Externo (UFAM)

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Biblioteca do ITEGAM**

Batista, Roberto Lopes, 2022 - MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS BASEADO EM GEORREFERENCIAMENTO E ALGORITMO GENÉTICO / Roberto Lopes Batista - 2022. 78 f., il: Colorido

Orientador: Dr(a). Iracyanne Retto Uhlmann

Dissertação: Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia, Programa de Pós Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental (PPG-EGPSA), Manaus - AM, 2022.

1. PRV 2. Roteirização 3. Veículo 4. AG 5. Otimização

CDD - 1001.ed.2022.29

AGRADECIMENTOS

Ao Supremo e Excelso Deus por me conceder gratuitamente o fôlego de vida e a oportunidade de conquistar mais um degrau na vida acadêmica em meio a uma pandemia da COVID-19 no qual muitas vidas foram ceifadas.

Aos meus pais Antônio Carlos e Raimunda que me ensinaram o valor do estudo e do trabalho.

À minha esposa Samerny e minha filha Yohanna pela compreensão das minhas constantes ausências do convívio familiar.

Ao meu sogro Moab e minha sogra Elda pelo apoio e orações.

A minha competente orientadora professora Dra. Iracyanne Uhlmann pelas palavras de incentivo, instrução e sabedoria que me guiaram nessa trajetória de grande aprendizado.

Ao professor Dr. Moysés Lima pelas orientações técnicas sobre a construção da solução, contribuindo com a sua experiência e no desenvolvimento desta pesquisa.

A toda equipe profissional do Itegam na pessoa do seu Diretor Presidente Dr. Jandecy Cabral por terem acreditado e me apoiado na materialização dessa conquista.

Aos meus colegas do mestrado Mauro, Hurgeson, Antônio, Júlio, Yara e Hinglisi pelo compartilhamento e aprendizado.

Aos meus colegas Aquiles, Socorro, Matilde, Silvana, Ralkma, Álvaro, Claudormiro e demais colegas e gestores dos Correios pela parceria, confiança e incentivo nas horas mais adversas.

Enfim, a todos os meus irmãos, amigos e intercessores a minha gratidão.

Epígrafe

Se precisar, mude a rota. Refaça o caminho.

Retorne ao ponto. Comece um novo, de novo.

Vá... (Karla Fioravante)

Dedicatória

Aos meus pais Antônio Carlos e Raimunda, minha esposa Samerny, minha filha Yohanna, meus sogros Moab e Elda, a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

RESUMO

BATISTA, Roberto Lopes. **MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS BASEADO EM GEORREFERENCIAMENTO E ALGORITMO GENÉTICO**. 2022. 78 Folhas. Dissertação do programa de pós-graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental (EGPSA), Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (ITEGAM), Manaus, 2022.

A demanda advinda do *e-commerce* no setor logístico de coleta e distribuição de encomendas tem crescido rapidamente, tendo sido impulsionada pela pandemia da COVID-19, porém, a infraestrutura necessária para o atendimento aos clientes e o cumprimento dos prazos não têm acompanhado a mesma velocidade, gerando insatisfação, prejuízos financeiros com pagamento de indenizações por atrasos e até perdas de clientes. Os elevados custos da operação e a concorrência acirrada exigem respostas ágeis por parte das empresas, principalmente, quando se trata do atendimento ao setor industrial. Nesse contexto, o processo é executado com base na experiência do motorista, sendo as rotas planejadas sem o auxílio de recursos tecnológicos. Este estudo aborda sobre o Problema de Roteamento de Veículos (PRV) como um dos mais desafiadores do setor logístico, tendo como objetivo principal propor um modelo de otimização de rotas para coletas e/ou entregas de produtos estabelecidos em contratos entre empresas de *courier* e grandes indústrias. Assim, foi apresentada uma revisão sistemática da literatura na qual foi feita uma análise do estado da arte sobre o PRV e suas variantes por meio da metodologia ProKnow-C, tendo sido identificado que o algoritmo genético (AG) foi a ferramenta mais utilizada no planejamento e roteirização de veículos. Nessa perspectiva, foi utilizada a técnica de inteligência computacional do AG em conjunto com as coordenadas de georreferenciamento para resolver esse problema logístico industrial complexo, no qual foi determinada a localização exata dos pontos a serem mapeados. Os cenários foram implementados em ambientes de simulação e comparados com dados de uma operação real, coletados em uma empresa de *courier*. Ao final da pesquisa, o novo modelo de roteirização possibilitou alcançar o resultado esperado, através de um método eficiente que gerou uma solução ótima global, considerando o menor tempo, a máxima capacidade e a distância mínima percorrida por um conjunto de veículos e, ainda, reduziu custos e melhorou a qualidade do processo estudado.

Palavras-Chave: PRV; Roteirização; Veículo; AG; Otimização.

ABSTRACT

BATISTA, Roberto Lopes. **VEHICLE ROUTING OPTIMIZATION MODEL BASED ON GEOREFERENCING AND GENETIC ALGORITHM.** 2022. 78 Sheets. Dissertation of the postgraduate program in Engineering, Process, Systems and Environmental Management (EGPSA), Galileo Institute of Technology and Education of the Amazon (ITEGAM), Manaus, 2022.

COVID-19 Accelerated by e-commerce in the logistics sector has been driven by the rapid collection pandemic, however, the infrastructure accompanied by customer service and meeting deadlines do not have the same speed as payment for delivery of payments, late payments and deliveries from clients. The successive costs of the operation and the fierce competition on the part of industrial companies, especially when dealing with the service to the business sector. Process is executed based on the driver's experience, which is experiences without the aid of technological resources. This study addresses the Vehicle Routing Problem (VRP) as one of the most objective in the logistics sector, with the main purpose of proposing a delivery delivery of routes for collection and/or contracts for products contracted in contracts between courier companies and large companies. Thus, a systematic review of the literature was presented, in which an analysis of the state of the art on the PRV and its variants was carried out through the ProK methodology, having identified that the animal used (GA) was the most tool in the planning and routing of vehicles. This perspective used a GA computational intelligence technique in conjunction with complex georeferencing coordinates to solve this industrial logistical problem, not which the exact location of the mapped points was determined. The scenarios were implemented in simulation systems and compared with data from a real operation, with a courier company. At the end of the research, the new route model of possible expected result, through an efficient method, the maximum capacity and the minimum distance by an optimized method for the execution of vehicles and, still, an efficient time, optimized for an optimal solution costs and improved the quality of the studied process.

Keywords: VRP; Routing; Vehicle; GA; Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Resumo do processo de seleção do portfólio bibliográfico seguindo o método ProKnow-C.....	27
Figura 2.2 – Classificação do conteúdo dos artigos com base na categoria.....	31
Figura 2.3 – Classificação do conteúdo dos artigos com base na abordagem metodológica ..	36
Figura 3.1 – Procedimento metodológico.....	46
Figura 3.2 – Fluxo básico da linha de transporte.....	47
Figura 3.3 – Roteirização da coleta e/ou entrega nos clientes de contrato e unidades de transferências de carga.....	49
Figura 4.1 – Parâmetros do algoritmo genético.....	56
Figura 4.2 – Taxa de redução de viagens	60
Figura 4.3 – Gráfico de iteração e distância	61
Figura 4.4 – Mapa das rotas otimizadas	61
Figura 4.5 – Resultado gerado pelo AG	62
Figura 4.6 – Rota 1 simulada no Google Maps	62
Figura 4.7 – Rota 2 simulada no Google Maps	63
Figura 4.8 – Rota 3 simulada no Google Maps	63
Figura 4.9 – Rota 4 simulada no Google Maps	64
Figura 4.10 – Rota 5 simulada no Google Maps	64
Figura 4.11 – Gráfico de redução de distância	65
Figura 4.12 – Gráfico de redução de tempo	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Resumo dos artigos de revisões de literaturas anteriores	23
Quadro 2.2 – Critérios de inclusão e exclusão de artigos.....	28
Quadro 2.3 – Tipos de PRV pesquisados no período de 2018 a 2021	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tempos computacionais fatoriais para a resolução do caixeiro viajante	43
Tabela 2.2 – Dimensão de possibilidades em relação ao número de cidades do caixeiro viajante	43
Tabela 4.1 – Matriz de distâncias	57
Tabela 4.2 – Parâmetros do GA.....	58

LISTA DE SIGLAS

AG	Algoritmo Genético (GA - <i>Genetic Algorithm</i>)
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCAP	Centro de Controle e Captação
CD	Centro de Distribuição
CE	Centro de Entrega
CEP	Código de Endereçamento Postal
CFRS	<i>Algorithm of Cluster-First-Route-Second</i>
CLBMs	<i>Crowdbased Logistics Business Models</i>
CLP	Computador Lógico Programável
CO₂	Dióxido de Carbono
CT	Centro de Tratamento
CVRP	<i>Capacited Vehicle Routing Problem</i>
DVRP	<i>Dynamic Vehicle Routing Problem</i>
DVRPTW	<i>Dynamic Vehicle Routing Problem With Time Windows</i>
ECT	Empresa Brasileira de Correios e Telégrafos
FSMVRP	<i>Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem</i>
FVRP	<i>Fuzzy Vehicle Routing Problem</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GVRP	<i>Green Vehicle Routing Problem</i>
HGA	<i>Hybrid Genetic Algorithm</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBM	<i>International Business Machines Corporation</i>
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)

ITS	<i>Intelligent Transport System</i>
LABMCDA	Laboratório de Metodologias Multicritério em Apoio à Decisão
LRP	<i>Location Routing Problems</i>
LRPVRP	<i>Location Routing Problem Vehicle Routing Problem</i>
MCVRP	<i>Multi-compartment Vehicle Routing Problem</i>
MDVRP	<i>Multi Depot Vehicle Routing Problem</i>
MEVRP	<i>Multi-echelon Vehicle Routing Problem</i>
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
NR-EGA	<i>Elitist Genetic Algorithm with Improved Initialization of Neighbor Routing</i>
OVRP	<i>Open Vehicle Routing Problem</i>
PDPVRP	<i>Pickup and Delivery Problem Vehicle Routing Problem</i>
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
PIM	Polo Industrial de Manaus
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
ProKnow-C	<i>Knowledge Development Process – Constructivist</i>
PRV	Problema de Roteamento de Veículo
PRVC	Problema de Roteamento de Veículo Capacitado
PVRP	<i>Periodic Vehicle Routing Problem</i>
SCM	Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos (<i>Supply Chain Management</i>)
SDVRP	<i>Split Delivery Vehicle Routing Problem</i>
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SVRP	<i>Stochastic Vehicle Routing Problem</i>
TDVRP	<i>Time Dependent Vehicle Routing Problem</i>
TI	Tecnologia da Informação
TPI	Tempo de Percurso Improdutivo

TS	<i>Tabu Search</i>
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i>
UA	Unidade de Atendimento
VRP	<i>Vehicle Routing Problem</i>
VRPLC	<i>Vehicle Routing Problem With Loading Constraint</i>
VRPRL	<i>Vehicle Routing Problem in Reverse Logistics</i>
VRPTW	<i>Vehicle Routing Problem With Time Windows</i>
WWO	<i>Water Wave Optimization</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	18
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO.....	21
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Geral	21
1.2.2 Específicos	21
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
CAPÍTULO 2	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS E SUAS VARIANTES	23
2.1.2 Procedimentos de Seleção do Portfólio Bibliográfico	25
2.1.3 Resposta as Questões de Pesquisa	29
2.1.3.1 <i>Atualmente, quais são as ferramentas usadas atualmente para a otimização de rotas?</i>	29
2.1.3.2 <i>O que tem sido estudado em roteirização via courier com casos práticos reais?</i> 30	
2.1.3.3 <i>Quais são as principais tendências para a roteirização por courier?</i>	33
2.1.3.4 <i>Quais são os tipos de modais mais utilizados nos serviços de coleta e entrega?</i>	35
2.1.3.5 <i>Quais são as abordagens metodológicas que foram aplicadas nas soluções de PRV?</i>	36
2.1.4 Discussão sobre os Resultados da Revisão de Literatura.....	36
2.2 ALGORITMOS GENÉTICOS	38
2.2.1 Parâmetros do Algoritmo Genético	39
2.3 GEOREFERENCIAMENTO.....	40
2.4 O PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE	41

2.5 O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS.....	44
2.5.1 O Problema de Roteamento de Veículos Capacitados.....	44
CAPÍTULO 3	46
3 METODOLOGIA.....	46
3.1 ETAPA 1: DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	46
3.1.1 Visita para Análise do Processo.....	46
3.1.2 Revisão Sistemática da Literatura	48
3.1.2 Revisão Exploratória da Literatura.....	48
3.2 ETAPA 2: DEFINIÇÃO DO MODELO CONCEITUAL E FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO.....	49
3.2.1 Modelo Conceitual.....	49
3.2.2 Definição de Ferramentas Simulação e Otimização	50
3.3 ETAPA 3: SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO	51
3.3.1 Simulação e Otimização do Modelo Conceitual.....	51
3.3.2 Validação do Modelo	52
CAPÍTULO 4	53
4 APLICAÇÃO PRÁTICA.....	53
4.1 CASO TESTE	53
4.3 PARÂMETROS DO ALGORITMO GENÉTICO.....	55
4.4 ANÁLISE DO RESULTADO.....	59
CAPÍTULO 5	67
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
5.1 CONCLUSÕES.....	67
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS.....	69
APÊNDICE A	77

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Em tempos de pandemia, o mundo dos negócios teve que se reinventar e se adaptar a alta demanda gerada pelo isolamento social que foi a principal medida adotada por vários países para conter o avanço do novo Coronavírus (COVID-19). Esse processo resultou numa significativa mudança de comportamento no qual o consumidor substituiu as compras presenciais pelo *e-commerce* (comércio eletrônico) devido ao fechamento do comércio. Tal fato, obrigou as empresas a investirem em tecnologia e a utilizarem os serviços de *delivery* (entrega em domicílio) para não fecharem as portas, isso afetou toda a cadeia de suprimentos, exigindo que as empresas tomassem decisões ágeis e tornassem os processos produtivos eficientes para atender às expectativas, cada vez mais exigentes, dos clientes.

Essa onda impulsionou a evolução de ferramentas de análise, modelagem e otimização de processos. No Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos (*Supply Chain Management - SCM*), a gestão logística se apresenta com maior oportunidade de otimização, pois trabalha com planejamento e operação de sistemas físicos, gerenciais e de informação, envolvendo tomada de decisão em relação a localização de instalações, aquisição de frotas, transporte e gerenciamento de estoque (GANESH; NALLATHAMBI; NARENDRAN, 2007).

A eficiência da indústria está relacionada diretamente a performance da logística. Ambas precisam estar sincronizadas em seus processos de tal forma a evitar atrasos e falta de insumos essenciais para o ambiente fabril. Neste atual contexto, Straka *et al.* (2020) afirma que as soluções de problemas logísticos industriais complexos requerem a utilização de técnicas computacionais como o uso de algoritmos, heurísticas, estatística, modelagem matemática e simulação, a fim de gerenciar os fluxos de matérias de maneira correta.

O advento da indústria 4.0, resultante da implementação da internet das coisas (em inglês: *Internet of Things*, IoT), crescimento da concorrência internacional, da volatilidade do mercado, da demanda por produtos personalizados e o encurtamento dos ciclos de vida do produto, aumentou o nível de complexidade da cadeia logística e trouxe um novo conceito logístico chamado de logística inteligente, termo traduzido do inglês “*smart logistics*”. (DOUAIQUI, 2018).

Nesse contexto, o setor de transporte é um dos mais importantes e críticos segmentos de análise, pois concentra a maior fatia dos custos logísticos que é cerca de 50 a 60% dos custos totais (PURNAMASARI; SANTOSO, 2018). Para Goetschalckx (2011) os custos operacionais incluem os custos fixos e variáveis para operar os sistemas, sendo os custos fixos um valor nominal fixo de transporte gastos com investimento e administração de veículos e o custo variável depende da operação de transporte e incluem as despesas, por exemplo, de combustível, salários de funcionários, manutenção e manuseio dos veículos. Para esta pesquisa, foi considerada o custo variável, porém, de maneira simplificada levando em consideração a política da empresa analisada que paga o frete por quilometragem utilizada.

Dentre as principais atividades do serviço logístico de transporte de mercadorias, estão: escolha do modal, programação, roteirização e consolidação da carga. Neste segmento, o Problema de Roteamento de Veículo (PRV, que vem do inglês “*Vehicle Routing Problem*” (VRP), é um dos mais desafiadores do ramo da logística. Sendo o Problema do Caixeiro Viajante, traduzido do termo em inglês “*Traveling Salesman Problem*” (TSP), um dos casos mais conhecidos e amplamente abordado na literatura, para o qual muitos pesquisadores desenvolveram fórmulas e métodos para encontrar a solução ótima, a fim de obter a distância mínima a ser percorrida por um vendedor que precisa visitar vários nós e retornar ao ponto de partida inicial. Apesar de o PRV possuir objetivo semelhante ao TSP, com veículos substituindo vendedores e o objetivo de obter a soma das distâncias de mínimas, existe uma diferença básica, na qual o PRV não pode exceder a capacidade do veículo (GANESH; NALLATHAMBI; NARENDRAN, 2007).

A operação de transporte é um componente vital para a gestão da logística tendo as empresas de *courier* como o seu principal operador na grande maioria dos países ao redor do mundo. Os serviços se constituem na entrega de encomendas nacionais e internacionais, que podem ser um documento ou mercadoria. Neste aspecto, o fluxo operacional básico de uma empresa de *courier* inicia com a captação de um pacote do cliente, depois, passa pelas etapas de triagem e tratamento até a entrega na última milha. Este serviço deve ser prestado com rapidez e qualidade (PURNAMASARI; SANTOSO, 2018).

Com base nas afirmações de Purnamasari e Santoso (2018) em que o TSP não leva em consideração as variáveis de tempo operacional de entrega e de capacidade do veículo, o método mais indicado para os processos de *courier* é o PRV. Por isso, este estudo abordará apenas questões referentes ao PRV com o propósito de descobrir qual é o modelo mais adequado para o serviço de entrega para as empresas de *courier*. Um dos primeiros estudos a

esse respeito foi o de Dantzig e Ramser (1959) intitulado de “Problema de Despacho de Caminhão” que tinha o objetivo de encontrar a rota mais curta para a distribuição de gasolina em postos de combustível utilizando caminhões.

A lacuna apontada por Bodin (1990) na qual muitos dos problemas descritos na literatura simplificam demais o que ocorre na prática ainda hoje é uma realidade. Por exemplo, todos os veículos são homogêneos e localizados no mesmo depósito, não possuem janelas de tempo, e a capacidade do veículo e jornada de trabalho são ilimitadas. Apesar de haver muita informação sobre roteamento de veículos e programação, poucos casos práticos reais são encontrados na literatura.

Para Gupta e Lal (2018) muitos algoritmos têm sido utilizados para otimização de rotas. Dentre os principais, foram comparados os desempenhos de alguns modelos na literatura como, por exemplo, *Pbest*, *Nbest*, *Gbest*, *Tabu search*, *Dijkstra*, *Floyd*, *Warshall*, *Simulated Annealing*, *Greedy*, *Hill climbing* e *Genetic Algorithm*. Chegando-se a conclusão que o Algoritmo Genético é o modelo mais adequado, porém, com algumas adaptações (MUSLU; DOGAN, 2020). Entretanto, alguns autores perceberam que apenas o parâmetro distância não era suficiente para a otimização de rota, sendo acrescentado posteriormente o tempo, levando-se em consideração o atraso devido o tráfego. (SHARMA; KHURANA, 2013; XU; YAN; LI, 2011).

Este estudo tem como alvo propor um modelo de otimização de rotas para coleta e entrega de produtos estabelecidos em contratos entre empresa de logística e grandes indústrias. Atualmente esse processo é feito com base na experiência do motorista, sem o auxílio de recurso tecnológico, as rotas são planejadas empiricamente de acordo com a média de atendimento dos contratos existentes com clientes corporativos. Os caminhões percorrem diariamente as rotas definidas no dia anterior, entretanto, algumas vezes o veículo de grande porte retorna ao ponto de origem subutilizado, pois, em alguns locais não tem carga a ser coletada e nem distribuída. Além disso, surgem outros problemas como o desperdício de recursos e retrabalhos decorrentes de falhas no processo, no qual o mesmo local é percorrido por mais de um empregado para a entrega de serviços diferentes. Nesse contexto, torna-se necessário propor um modelo de otimização da operação de coleta e distribuição que aumente a produtividade e melhore o aproveitamento da capacidade do veículo e da mão de obra, a fim de eliminar ociosidades e os tempos improdutivos decorrentes do tráfego e viagens desnecessárias.

1.1 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO

A demanda advinda do *e-commerce* no setor logístico de distribuição de encomendas tem crescido rapidamente, porém, a infraestrutura necessária para o atendimento aos clientes e o cumprimento dos prazos não tem acompanhado a mesma velocidade, o que pode gerar insatisfação, prejuízos financeiros com pagamento de indenizações por atrasos e até perdas de clientes. Os elevados custos da operação e a concorrência acirrada exigem respostas ágeis por parte da empresa, principalmente, quando se trata do atendimento às empresas do setor industrial, responsáveis pelo fomento da economia e por milhares de empregos.

A relevância desse estudo ficou em evidência durante a pandemia, em consequência do vírus COVID-19, que mostrou ao mundo a importância da logística no atendimento as necessidades básicas do ser humano, desde a distribuição de medicamentos, alimentos e também no suporte e operacionalização das atividades econômicas. Hoje é vital para a sobrevivência de qualquer empresa que se tenha uma rede distribuição eficiente com baixos custos e adaptada às novas tecnologias.

Este estudo propõe um modelo de otimização de rotas para empresas de *courier* (empresas que prestam serviço de coleta e entrega expressa) que fazem a logística de distribuição de produtos estabelecidos em contratos com grandes indústrias. Acredita-se que o novo modelo de entrega possibilitará um melhor aproveitamento dos recursos existentes e redução de custos operacionais com a otimização do processo, favorecendo os aumentos de receita, do nível de qualidade e da capacidade de atendimento para novos clientes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Propor um modelo de otimização de rotas para coletas e/ou entregas de produtos estabelecidos em contratos entre empresa de *courier* e grandes indústrias.

1.2.2 Específicos

- Identificar lacunas e oportunidades de melhoria no processo de distribuição e coleta para clientes corporativos;
- Estruturar um modelo conceitual para roteirização de veículos para atendimento as demandas estabelecidas em contratos com empresas;
- Desenvolver e avaliar o modelo conceitual em um ambiente de simulação.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo são descritas, de forma introdutória, o assunto da pesquisa, partindo-se do geral para o particular, sendo incluídas também a justificativa para o interesse pela pesquisa e, os objetivos geral e específicos. O capítulo 2, descreve a revisão de literatura sobre roteirização por *courier*, abordando as pesquisas recentes sobre o tema, tendências e estado da arte, além de revisão exploratória sobre Algoritmos Genéticos (AG), Georreferenciamento, o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e o Problema de Roteamento de Veículos (PRV). No capítulo 3, é apresentada a metodologia utilizada para alcançar os objetivos propostos, sendo abordados o modelo conceitual e as etapas de desenvolvimento e implementação. No capítulo 4, são informadas as discussões e análises dos resultados do estudo, e no capítulo 5, apresenta-se as considerações finais e recomendações para futuras pesquisas sobre o tema.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o desenvolvimento e análise estrutural de revisão sistemática de literatura a respeito do Problema de Roteamento de Veículos (PRV) ou *Vehicle Routing Problem* (VRP) e variantes, usando a metodologia *Knowledge Development Process – Constructivist* (ProKnow-C), desenvolvida por Afonso *et al.* (2011). Além de revisão exploratória sobre Algoritmos Genéticos (AG), Georreferenciamento, o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e o Problema de Roteamento de Veículos (PRV), visando o embasamento teórico da solução proposta.

2.1 UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS E SUAS VARIANTES

A partir das revisões de literaturas anteriores é possível encontrar lacunas, questões a serem exploradas e, ainda, obter informações atualizadas e de fontes confiáveis. Neste propósito, foram analisados dez artigos, dentre os quais somente dois eram específicos de revisão sobre o PRV, os quais têm suas informações resumidas no Quadro 2.1.

Quadro 1.1 – Resumo dos artigos de revisões de literaturas anteriores

Artigo	Título	Objetivo	Conclusões	Classificações	Oportunidades
Ganesh, Nallathambi e Narendran (2007)	<i>Variants, solution approaches and applications for Vehicle Routing Problems in supply chain: agile framework and comprehensive review</i>	Desenvolver uma estrutura de revisão abrangente em várias variantes e abordagens de solução de PRV.	Os procedimentos heurísticos são uma alternativa para obter soluções quase ótimas dentro de um tempo computacional razoável.	Os PRV's são classificados em: Relação ao depósito: a) Depósito único; b) Depósito múltiplo; Restrições relacionadas ao veículo: a) Capacidade homogênea do veículo; b) Capacidade heterogênea do veículo; c) PRV de frota fixa heterogênea; d) PRV de frota mista. Tipo de operações: 1) coleta pura ou entrega pura; 2) entrega antes da coleta; 3) coleta antes da entrega; 4) coleta e entrega combinadas. Características do problema: PRV's determinísticos;	Necessidade de desenvolver soluções para resolver problemas de roteamento de veículos com casos práticos reais.

				PRV's estocásticos: Carga constante e tempo variável, carga variável e tempo constante e carga variável e tempo variável. As principais abordagens de solução para PRV, são: Modelagem matemática, heurísticas, meta-heurísticas, abordagens interativas e combinação das opções acima.	
Purnamasari e Santoso (2018)	<i>Vehicle Routing Problem (VRP) for courier service: A review</i>	Descobrir que tipo de PRV é usado para o serviço de correio, sendo referencial para pesquisas futuras.	Os tipos de PRV's mais usados para os serviços de correios são PRV Dinâmico (<i>Dynamic VRP – DVRP</i>) e PRV com Janela de Tempo (<i>VRP With Time Windows – VRPTW</i>) ou os dois juntos, PRV Dinâmico com Janela de Tempo (<i>Dynamic VRP With Time Windows – DVRPTW</i>).	Vários PRV's foram desenvolvidos no período de 1959 a 2014, de acordo com a seguinte classificação: <i>Capacited VRP (CVRP), Time Dependent VRP (TDVRP), Pickup and Delivery Problem VRP (PDPVRP), Multidepot VRP (MDVRP), Stochastic VRP (SVRP), Location Routing Problem (LRPVRP), Periodic VRP (PVRP), Dynamic VRP (DVRP), VRP With Time Windows (VRPTW), Fleet Size and Mix VRP (FSMVRP), Multi-Compartment VRP (MCVRP), Split Delivery VRP (SDVRP), Fuzzy VRP (FVRP), Open VRP (OVRP), VRP With Loading Constraint (VRPLC), Echelon VRP (MEVRP), Green VRP (GVRP) e VRP in Reverse Logistics (VRPRL)</i> .	Os dados de origem foram coletados apenas de periódicos científicos gratuitos do Google Acadêmico, podendo ser utilizadas outras bases de pesquisa científica.

Embora os artigos de revisão de Ganesh, Nallathambi e Narendran (2007) apresentem um vasto resumo de abordagens metodológicas e diversas formas de aplicações encontradas na literatura a respeito de PRV e suas variantes, trata-se de um artigo publicado há 14 anos, indicando a necessidade de uma revisão mais atualizada em relação as novas tendências e casos

práticos atuais, haja vista que o referencial teórico utilizado se refere a trabalhos publicados entre 1964 e 2006. Também não foi possível encontrar nesta revisão os principais modais utilizados no serviço de coleta e entrega.

O artigo de revisão apresentado por Purnamasari e Santoso (2018) realizou uma abordagem a respeito dos tipos de PRV's usado para o serviço de *courier*. Este estudo mostra a classificação dos tipos de PRV's, no período de 1959 a 2014, com o objetivo de resolver o problema da rota mais curta, a fim de minimizar os custos de transporte. Foram coletados dados de periódicos de 2000 a 2018 com base no ano de publicação, abrindo caminho para a continuidade do estudo, a fim de verificar a evolução do tema até os dias atuais. Adicionalmente, em suas recomendações para pesquisas futuras, os autores sugeriram acrescentar estudos de outras fontes de consulta, além das disponíveis em bases de acesso gratuito, como periódicos científicos pagos, os quais podem obter contribuições relevantes para análise. Em sua pesquisa foram utilizadas revistas científicas com artigos de valor não comercial disponibilizados no Google Acadêmico pelas seguintes editoras: Elsevier, Springer Link, Taylor e Francis, IEEE, Informs, Growing Science e Witpress. Também não foram citados exemplos de aplicações práticas no referencial teórico utilizado, dessa forma, não foi possível identificar no artigo de revisão analisado se as categorias das soluções de PRV's descritas são decorrentes de uma solução prática ou teórica, muito menos se a abordagem metodológica é fruto de estudo de caso, modelagem e simulação ou pesquisa-ação.

Face a necessidade de um estudo mais específico a respeito de roteirização, este capítulo apresenta uma nova revisão sistemática de literatura, abrangendo as conceituadas bases de pesquisas Web of Science e Scopus, buscando responder as seguintes perguntas de pesquisa:

- a) Atualmente, quais são as ferramentas usadas para a otimização de rotas?
- b) O que tem sido estudado em roteirização via *courier* com casos práticos reais?
- c) Quais são as principais tendências para a roteirização por *courier*?
- d) Quais são os tipos de modais mais utilizados nos serviços de coleta e entrega?
- e) Quais são as abordagens metodológicas que têm sido aplicadas nas soluções de PRV?

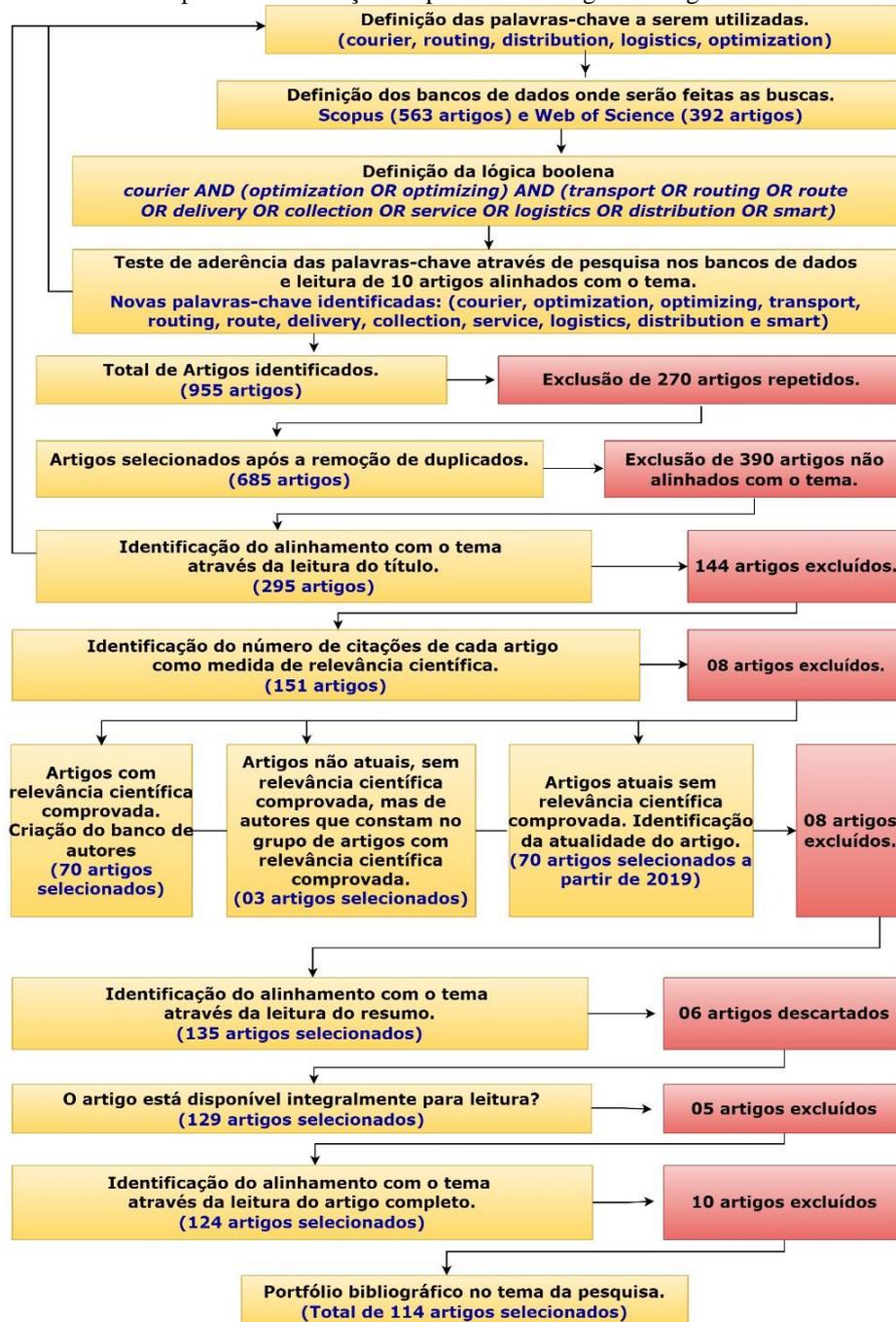
2.1.2 Procedimentos de Seleção do Portfólio Bibliográfico

Para seleção do portfólio de artigos adotou-se a metodologia de pesquisa ProKnow-C desenvolvida pelo Laboratório de Metodologias Multicritério em Apoio à Decisão

(LABMCDA) descrito por Afonso *et al.* (2011), o resumo com os resultados de cada etapa pode ser visualizado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Inicialmente foi realizada busca exploratória na base de dados do Science Direct, seguindo a lógica booleana: *(routing OR distribution OR logistics OR optimization) AND courier*. Então, foram selecionados 10 artigos publicados nos últimos cinco anos para identificação de lacunas e oportunidades de pesquisa e, assim definir o escopo do estudo. Em seguida, iniciando a revisão sistemática de literatura, foram definidas as palavras-chave e a lógica booleana para busca nas bases Scopus e Web of Science: *courier AND (optimization OR optimizing) AND (transport OR routing OR route OR delivery OR collection OR service OR logistics OR distribution OR smart)*.

Figura 2.1 – Resumo do processo de seleção do portfólio bibliográfico seguindo o método ProKnow-C



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

As palavras-chave foram confirmadas através de um teste de aderência com o objetivo de certificar quais foram as palavras mais adequadas e a melhor combinação possível entre elas. Nesta primeira etapa, obteve-se um banco de dados com 955 artigos que passaram por um processo de filtragem no qual foram excluídos 270 artigos repetidos.

Os artigos que compõem a base do referencial teórico utilizado neste estudo, foram selecionados mediante a definição de critérios de inclusão e exclusão, conforme descrito no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Critérios de inclusão e exclusão de artigos

Inclusão/Exclusão	Critério	Explicação dos critérios
Inclusão	Fortemente relacionado com o tema (FR)	A pesquisa está relacionada à roteirização, tendências, ferramentas e inovações em empresas de <i>courier</i> , apresentando aplicações práticas na distribuição de encomendas. Em linhas gerais, as publicações tratam da logística de distribuição, utilizando principalmente os modais: aéreo e rodoviário. bem como, a entrega na última milha a pé, com bicicleta e/ou de forma motorizada.
Exclusão	Artigo incompleto (AI)	Alguns artigos estavam sem o texto completo disponível para ser avaliado, continham apenas o título, resumo e palavras-chave. Outros periódicos não foram encontrados ou não estavam acessíveis.
	Não relacionado com o tema (NR)	Artigo não está alinhado com o tema de roteirização, o título indica outro assunto que não está relacionado com <i>courier</i> . Artigo tratam de assuntos específicos como transporte celular; fibra, vírus, logística de material biológico, dentre outros.
	Vagamente relacionado com o tema (VR)	Alguns artigos não abordam questões de otimização de rota e, sim, outros problemas da cadeia de suprimentos.

Fonte: Adaptado de Uhlmann e Frazon (2018).

Em seguida, fez-se a leitura dos títulos dos artigos, sendo selecionados 295 e descartados 390 por não estarem alinhados com o tema. Ainda na etapa de filtragem, verificou-se a relevância científica de 151 artigos selecionados, àqueles que representavam 85% das citações no Google Acadêmico. Após essa etapa, restaram 144 artigos, dentre os quais 70 destes foram considerados com relevância científica, sendo feita a leitura do resumo para se certificar que esses artigos estavam realmente alinhados com o tema da pesquisa. Depois disto, foi criado um banco com uma lista de autores a partir dessa seleção.

Em relação ao grupo de artigos nos quais a relevância científica não pode ser confirmada, verificou-se a data de publicação, sendo selecionados os periódicos escritos a partir de 2019 para a leitura do resumo. Quanto aos artigos mais antigos fez-se uma checagem para saber se os autores faziam parte do banco de autores com artigos reconhecidos cientificamente; nesse caso, foram encontrados somente 3 artigos nos quais os autores constavam na lista. Para os demais artigos, foram lidos 70 resumos, sendo descartados 8 artigos que não estavam alinhados com o assunto dessa pesquisa.

Finalmente, a formação do portfólio bibliográfico consistiu na junção dos artigos com relevância científica confirmada com os artigos atuais e aqueles cujos os autores fazem parte da seleção composta pelo banco de autores, resultando num total de 135 artigos selecionados.

Ainda foi verificado a questão da disponibilidade, sendo excluídos nesse quesito 5 artigos que não foram encontrados ou não estavam mais disponíveis para consulta. Então, os 124 artigos restantes foram lidos integralmente, sendo descartados 10 artigos que não estavam alinhados com o tema da pesquisa. Ao final desse processo, restaram 114 artigos selecionados que foram incorporados ao portfólio bibliográfico deste estudo sobre roteirização, conforme ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

2.1.3 Resposta as Questões de Pesquisa

Neste tópico, serão respondidas as questões de pesquisa com base no portfólio bibliográfico.

2.1.3.1 Atualmente, quais são as ferramentas usadas atualmente para a otimização de rotas?

Considerando estudos publicados nos últimos 5 anos, 9 artigos apontam uma predominância na utilização de algoritmos genéticos para a solução de PRV, conforme ilustrado no Quadro 2.3. Os artigos com soluções heurísticas continuam superando as determinísticas, principalmente, devido os métodos exatos serem muito caros, difíceis de implementar por necessitarem de rapidez no tempo de resposta em ambiente dinâmico, o que exige um aumento do esforço computacional, por isso, os algoritmos metaheurísticos têm se tornado uma alternativa viável (JANSSENS *et al.*, 2015). Também se observa a combinação de métodos com o propósito de obter um melhor resultado (CHEN, D. *et al.*, 2020; CHEN, YUEYUE *et al.*, 2019; CHEN, YUJIE *et al.*, 2019; GUERRAZZI, 2020; NIELS; HOF; BOGENBERGER, 2018; PENG *et al.*, 2019; TURSKÁ *et al.*, 2019).

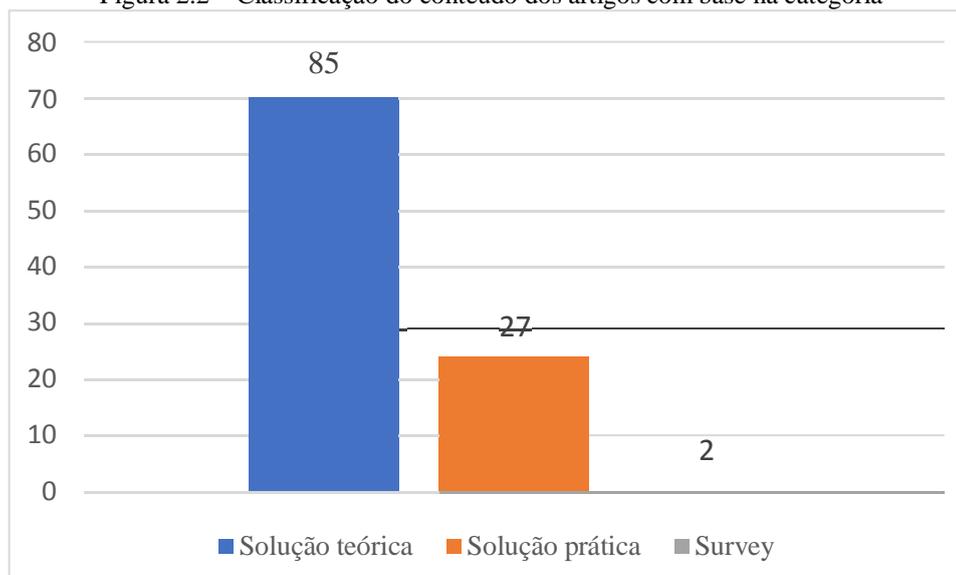
Quadro 2.3 – Tipos de PRV pesquisados no período de 2018 a 2021

Tipo PRV	QTD	Referências
<i>Algorithm genetic (GA); Genetic Lighting Algorithm (MAP-Elites); Adaptive Elitist Genetic Algorithm with Improved Neighbor Routing Initialization (NR-EGA); Hybrid Genetic Algorithm (HGA)</i>	9	Costa <i>et al.</i> (2018); Kukartsev <i>et al.</i> (2020); Liu <i>et al.</i> (2019); Muslu e Dogan (2020); Peng <i>et al.</i> (2019); Syauqi e Zagloel (2020); Urquhart, Hoehl e Hart (2019); Zhao <i>et al.</i> (2019); Zhu, Lee e Wang (2021).
<i>Tabu search (TS); Tabu Search (TS) + Adaptive Large Neighbourhood Search (ALNS); Two-level Local Search Heuristic</i>	5	Giovanni, Gastaldon e Sottovia (2019); Laganà, Laporte e Vocatione (2021); Mcleod <i>et al.</i> (2020) Niels, Hof e Bogenberger (2018); Tu <i>et al.</i> (2019)
<i>Two-echelon Location-routing Problem (2E-LRP); Binary Integer Programming (BIP); Mixed Integer Linear Programming (MILP); Mixed Integer Linear Programming Auction-based Heuristic; Algorithm Branch and Cut (B&C)</i>	4	Bruck <i>et al.</i> (2019); Mirhedayatian <i>et al.</i> (2021); Sitek <i>et al.</i> (2021); Steever, Karwan e Murray (2019)
<i>Algorithm Cluster-first route-second (CFRS); Heuristic cluster-first route-second (CFRS) + Metaheuristic Tabu Search (TS); Algorithm Clustering Mini-route</i>	3	Bretin, Desaulniers e Rousseau (2021); Guerrazzi (2020); Zhao Q., Zhou e Pedrielli (2020)
<i>Efficient Approximation Algorithm; Nearest Neighbor Method; Minimum Spanning tree Method; Fletcher-Clark's Method; Closest Insertion Method</i>	2	Turská <i>et al.</i> (2019); Zeng, Tong e Chen (2019);
Outros	23	Abbatecola <i>et al.</i> (2018); Chen, D. <i>et al.</i> (2020); Chen, Yueyue <i>et al.</i> (2019); Chen Yujie <i>et al.</i> (2019b); Dupljanin <i>et al.</i> (2019); Gdowska, Viana e Pedroso (2018); Krityakierne e Laesanklang (2020); Lee, Chae e Kim (2019); Lee <i>et al.</i> (2020); Lin, Nishiki e Tavasszy (2020); Mohd <i>et al.</i> (2019); Pincay <i>et al.</i> (2020a); Pincay <i>et al.</i> (2020b); Restrepo, Semet e Pocreau (2019); Rosanti <i>et al.</i> (2019); Seakhoa-King <i>et al.</i> (2019); Tebaldi, Murino e Bottani (2020); Woiceshyn <i>et al.</i> (2018); Yildiz (2021a); Yildiz (2021b); Yildiz e Savelsbergh (2019); Zhang e Thompson(2019); Zhou e Lin (2019).

2.1.3.2 O que tem sido estudado em roteirização via courier com casos práticos reais?

As pesquisas mostram que a maioria dos estudos tem o foco concentrado em soluções teóricas, sendo encontrados 85 artigos; enquanto somente 23,68% do portfólio bibliográfico está voltado para aplicações reais, ou seja, 27 artigos apresentavam soluções práticas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Figura 2.2 – Classificação do conteúdo dos artigos com base na categoria



A seguir são descritas algumas aplicações práticas encontradas nas pesquisas:

Alguns autores desenvolveram um modelo de roteamento de veículo de localização central com múltiplos depósitos para planejamento de rede para o serviço de entrega e coleta de encomendas, considerando veículos com múltiplas capacidades, janelas de tempo associadas a depósitos e clientes (WASNER e ZPFEL, 2004; CESELLI; RIGHINI; SALANI, 2009). Uma versão adaptada do *Water Wave Optimization* (WWO) para o problema de roteamento de veículos capacitados foi aplicada por Tebaldi, Murino e Bottani (2020) em um caso real, usando dados de sonda.

Outros pesquisadores fizeram integração entre o Sistema de Informação Geográfica (*Geographic Information System* - GIS), o Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS), a Tecnologia *Wireless* e o Sistema de Transporte Inteligente (*Intelligent Transport System* - ITS) com o objetivo de otimizar o serviço de coleta e entrega, aumentando a produtividade através da formação de zonas geográficas para determinação de tempos, distâncias e rotas preferenciais e utilizando veículos dinâmicos (BUTTON, DOYLE e STOUGH, 2001; JUNG, LEE e CHUN, 2006; MORERI, MAPHALE e NKHWANANA, 2017; WANG, THOMPSON e BISHOP, 1999). Já Mohd *et al.* (2019) optou por desenvolver um *framework* de aplicativo *android* para um sistema de entrega de encomendas mais inteligente, combinando o uso das tecnologias de comunicação atuais como GPS, *Waze*, ferramentas *Android* e serviços em nuvem.

Também foram desenvolvidos algoritmos de otimização que calculam o número correto de veículos, as rotas e os horários de coleta mais adequados com aplicações em serviços bancários de encaminhamento de cheques (HILL *et al.*, 1988) e otimização de custos de transportes para serviços de correios (METTERS, 1996). Além da redução de custos operacionais, Lee, Chae e Kim (2019) acrescentaram estudos sobre os efeitos resultantes em termos de redução das emissões gerais de carbono ao substituírem caminhões por bicicletas elétricas nos serviços de *courier*. Nessa direção também seguiu Zhao *et al.* (2019) tendo como alvo o modal metroviário utilizado para o transporte de linha de serviços de entrega expressa dentro da cidade para reduzir custos, melhorar a eficiência, aumentar a satisfação do cliente e aliviar o congestionamento das estradas e a poluição do ar. Ainda, outras práticas foram consideradas como a implementação da matriz de economia para resolver o problema do roteamento de veículos abertos capacitados e determinar a rota de distribuição, a fim de se obter um custo de distribuição mínimo, considerando a capacidade do veículo, o tempo de serviço e o layout das mercadorias no veículo (ROSANTI *et al.*, 2019; LIPOWEZKY; KORENFELD; IDESES, 2018).

Houve práticas que analisaram a qualidade dos processos de um operador de correios, avaliando a eficácia em relação aos prazos de entrega e eficiência de rota para um correio expresso aéreo (KARCZ e S LUSARCZYK, 2016; LIN, LAN e HSU, 2010). Van Lopik *et al.* (2020) conseguiu melhorar o desempenho da cadeia de suprimentos otimizando o serviço de suporte do correio de entrega através de dispositivos de navegação baseados nos moldes da indústria 4.0. Já Liu *et al.* (2019) implantou um sistema de planejamento da frota de *drones* em substituição ao serviço tradicional com o objetivo de reduzir custos e proteger o meio ambiente. Nesse mesmo propósito, McLeod *et al.* (2020) utilizando entregadores com bicicletas para entrega na última milha e conseguiu reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) em 45% e a distância de condução em 78%, resultando numa economia global de custos para a transportadores na faixa de 34 a 39%. Também, utilizando o mesmo modal, Lin, Nishiki e Tavasszy (2020) implementaram um experimento com ciclistas na Holanda para otimizar o desempenho e intrusividade de sistemas de *crowdshipping*, que é um modelo de entrega de produto por pessoas comuns, utilizando transportes diversos com o objetivo de minimizar os custos e o tempo de entrega das empresas de logística (PONTES *et al.*, 2020).

Dentre as diversas formas de aplicação, alguns pesquisadores implementaram algoritmos de otimização de rota de transportadora postal para a solução do problema clássico do caixeiro viajante. Nessa linha, Turská *et al.* (2019) trabalhou com uma coleta e entrega de envios postais

com peso até 2kg. Enquanto que Abbatecola *et al.* (2018) optou por um método heurístico distribuído baseado em cluster para resolver os problemas reais dos serviços de coleta em ambientes estáticos e dinâmicos, Zhao, Zhou e Pedrielli (2020) utilizaram um sistema de apoio a decisão para resolver o PRV incorporando a experiência do motorista, os dados históricos da empresa e os dados do Google Maps. Por sua vez, Restrepo, Semet e Pocreau (2019) trabalharam com um plano tático robusto para coletas domiciliares assistidas, visando a otimização de atribuição de carga.

Outro importante campo prático de atuação foi abordado por Pincay *et al.* (2020b) que aplicaram um método de particionamento de espaço para identificar padrões de movimento em rota com o objetivo de solucionar os complexos problemas de generalização das condições de tráfego, a partir de dados de sondagem de baixa amostragem derivados de operações de negócios de cinco meses de operação de um veículo do Correio Suíço. Uma importante contribuição foi dada por Krityakierne e Laesanklang (2020) para o ajuste heurístico de rota para tempo de trabalho equilibrado em logística urbana com experiência do motorista e informações de trânsito dependentes do tempo.

2.1.3.3 *Quais são as principais tendências para a roteirização por courier?*

Para responder essa questão foram selecionados 28 artigos dos últimos dois anos (2020-2021), dos quais somente 22 artigos continham recomendações futuras. Sendo que um caso não se tratava de serviços de *courier* e, sim, de entrega de alimentos sob demanda, utilizando o modelo de *crowdsourcing*, termo originário do inglês “*crowd*” – multidão e “*out-sourcing*” – terceirização (BRANQUINHO, 2016).

Novos estudos têm se concentrado na introdução de outros objetivos com novas funções e restrições em comprimento da rota, número de pontos na rota, priorização de clientes ou remessas, prazos de entrega para o problema modelado. Diversos trabalhos envolvendo a versão modificada da abordagem híbrida proprietária com aplicações utilizando Controlador Lógico Programável (CLP), termo traduzido do inglês *Programmable Logic Controller* (PLC), e do *Genetic Algorithm* – GA, cuja a tradução é Algoritmo Genético (AG), têm avançado e os resultados são muito promissores, pesquisas adicionais sobre modificação e desenvolvimento estão andamento, principalmente, com aplicações utilizando GA (SITEK; WIKAREK, 2019; SITEK *et al.*, 2021). Alguns pesquisadores fizeram experimentos usando algoritmo genético elitista para o problema de roteamento de veículos elétricos com bateria modelo de bateria dinâmica e janela de tempo (ZHU; LEE; WANG, 2021).

Há apontamentos sobre a necessidade de testar combinação entre heurísticas e abordagens exatas fornecidas na literatura (MIRHEDAYATIAN *et al.*, 2021). Existem estudos potenciais de aplicação de técnica de pesquisa GPS usando sensores inteligentes para coletar dados diários de viagens de veículos, incluindo rotas, tempos de permanência de transportadoras de carga no centro da cidade, soluções de problemas de roteamento de localização (*Location Routing Problems* - LRP) para melhorar a eficiência da entrega (ALJOHANI e THOMPSON, 2020). Tem sido observado, importantes avanços tecnológicos na área de veículos de entrega autônomos, internet das coisas, *blockchain* e robótica de armazenamento (HOSODA e IROHARA, 2020). Outros autores desenvolveram plataformas de Tecnologia da Informação (TI) para dar mais eficiência ao serviço de roteamento de veículos dos correios com a redução de tempo de entrega e custos, bem como a melhoria da qualidade do ar, além de implementação de técnicas de solução para resolução do problema de coleta e entrega intermodais (DRAGOMIR e DOERNER, 2020; GUERRAZZI, 2020). Também foram realizadas análises através de dados de sonda para descobrir padrões de movimento como paradas e limites de velocidades em operações de *courier* (PINCAY *et al.*, 2020b).

Uma forte tendência nos dias atuais e que teve um salto com a pandemia foi o modelo de economia compartilhada com a entrega de encomendas em conjunto com o transporte de passageiros (CHEN, Yueyue *et al.*, 2019). Outra possibilidade seria um serviço de entrega com distribuição sem contato físico entre entregador e cliente devido restrições a ambientes fechados e contágio de pessoas com comorbidades (CHEN, D. *et al.*, 2020). Com as medidas de restrições impostas pelas autoridades muitas pessoas recorreram aos serviços de *delivery* que está desafiando as empresas a se adequarem a essa nova realidade que exige soluções eficazes para lidar com demandas em larga escala, com janelas de tempo e com baixa densidade que vêm crescendo exponencialmente nos serviços postais (BRETIN; DESAULNIERS; ROUSSEAU, 2021). Nessa direção, tem se destacado os sistemas de *crowdshipping* que estão recebendo cada vez mais atenção na indústria e academia, conforme afirmam Lin, Nishiki e Tavasszy (2020).

Tem sido observado um interesse dos pesquisadores sobre desenvolvimento de algoritmos de simulação-otimização para resolver problemas de projetos de rede, determinar localizações, estimar e reduzir custos, otimizar processos em tempo real, que lidam com tomada de decisão sob várias restrições de capacidade (WANG; TAO; JIANG, 2021; YILDIZ, 2021a). Outros estudos de aprimoramento de linguagem de programação têm sido realizados com o objetivo de reduzir o número médio de interações e melhorar o tempo computacional que ainda é um grande desafio para o processo de roteirização (TEBALDI; MURINO; BOTTANI, 2020).

Outra forte tendência em relação aos serviços de transporte de mercadorias são as questões de impacto ambiental por conta do elevado consumo de combustível fóssil e, conseqüentemente, das emissões de CO₂ na atmosfera (LEE *et al.*, 2020; YILDIZ, 2021b). Neste aspecto, também foi apontado a necessidade de investigar melhores sequências de roteamento em tempo real com a inclusão das condições de tráfego (KRITYAKIERNE e LAESANKLANG, 2020; ZHAO; ZHOU; PEDRIELLI, 2020). Para Martinez-Sykora *et al.* (2020), as condições de tráfego dentro das áreas urbanas apresentam um grau de incerteza que afeta os tempos de direção, enquanto há muito pouca incerteza associada aos tempos de caminhada.

2.1.3.4 Quais são os tipos de modais mais utilizados nos serviços de coleta e entrega?

Em relação aos modais mais utilizados, 105 artigos descreveram estudos de otimização voltados para os sistemas: rodoviário, aeroviário, metroviário e ferroviário, dentre os quais destacou-se o rodoviário com 101 artigos, representando 92% de todo o portfólio. Sendo que o modal Hidroviário foi o único não encontrado no portfólio de artigos selecionados com o tema de roteirização. O que mostra uma escassez de trabalhos científicos com foco nesse campo de atuação e uma grande oportunidade de pesquisa devido a existência de grandes bacias hidrográficas que podem se constituir numa alternativa economicamente viável para os serviços de *courier*.

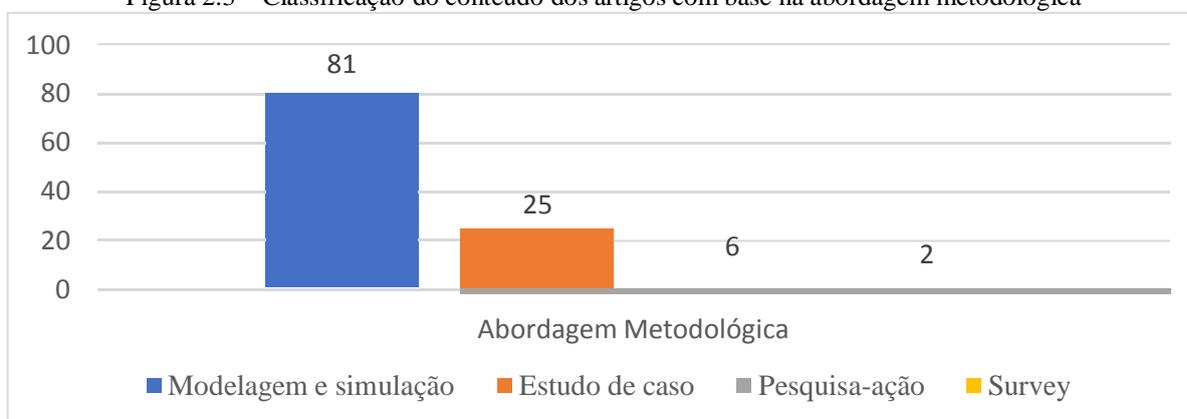
Quanto ao modal rodoviário, cerca de 74 artigos relataram estudos com a utilização de veículos automotivos de forma predominante (BRETIN; DESAULNIERS; ROUSSEAU, 2021; ALJOHANI e THOMPSON, 2020; CHEN, D. *et al.*, 2020; TEBALDI; MURINO; BOTTANI, 2020) e 9 artigos abordaram o uso de motocicletas para serviços de roteirização (BRUCK *et al.*, 2019; LIN; NISHIKI; TAVASSZY, 2020; MCLEOD *et al.*, 2020). Para Zhu, Lee e Wang (2021) que realizaram estudos com veículos elétricos, essa é uma importante alternativa de utilização de energia limpa para a proteção do meio ambiente. Seguindo essa mesma tendência, 3 artigos utilizaram bicicletas elétricas e até *scooters* para realizar entrega de encomendas (LEE; CHAE; KIM, 2019; LIPOWEZKY; KORENFELD; IDESES, 2018; URQUHART; HOEHL; HART, 2019). Para a entrega de última milha, 15 artigos relatam que as rotas de entrega ainda são feitas por veículos não motorizados, ou seja, as percorridas são a pé ou em bicicletas (TURSKÁ *et al.*, 2019; MARTINEZ-SYKORA *et al.*, 2020; YILDIZ B., 2021b; URQUHART; HOEHL; HART, 2019; ZHANG, L. e THOMPSON, 2019; VAN LOPIK *et al.*, 2020;

RESTREPO; SEMET; POCREAU, 2019; DUPLJANIN *et al.*, 2019; TU *et al.*, 2019; NIELS; HOF; BOGENBERGER, 2018; ZHANG, S. *et al.*, 2016; IRNICH, 2008; LIN, C., 2011).

2.1.3.5 Quais são as abordagens metodológicas que foram aplicadas nas soluções de PRV?

Dentre as principais abordagens encontradas na literatura (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), 81 dos artigos pesquisados recorreram a *softwares* de modelagem e simulação para a relação de testes, representando 71% do portfólio bibliográfico, o que reflete a análise feita na seção 2.3.2.

Figura 2.3 – Classificação do conteúdo dos artigos com base na abordagem metodológica



Os algoritmos de otimização identificados nesta revisão sistemática foram implementados através de diversas linguagens de programação, dentre as quais, destacam-se respectivamente, as linguagens de JAVA, C++ e Python. Para a realização de testes e validação dos processos de otimização nos ambientes de modelagem e simulação os *softwares* mais utilizados são, respectivamente, o IBM ILOG CPLEX e o MATLAB, além do uso de API do *Google Maps*. No que se refere a execução desses algoritmos, as soluções desenvolvidas foram predominantemente executadas em processadores Intel com chip multiprocessador, variando de 1 a 7 núcleos (*core*), com memória RAM de 256 MB a 128 GB, e velocidades de clock do processador entre 400 MHz e 3,60 GHz.

2.1.4 Discussão sobre os Resultados da Revisão de Literatura

Este capítulo é resultado de uma revisão sistemática de literatura que analisou o estado da arte para o PRV e suas variações, e as principais abordagens metodológicas utilizadas no

contexto da logística de distribuição. No decorrer do estudo, cinco questões de pesquisa foram respondidas, as respostas estão sintetizadas a seguir:

- a. Atualmente, os estudos com algoritmo genético demonstram predominância e forte tendência de combinação de métodos heurísticos, metaheurísticos e determinísticos em busca de uma melhor eficiência computacional e melhor resultado para otimização de rotas;
- b. Estudos com casos práticos reais ainda são minoria. Dentre os casos abordados, houve uma preocupação em reduzir a rota de coleta e entrega, redução de custos e tempo de entrega, além de minimizar os impactos ambientais provocados pela atividade de roteirização;
- c. As pesquisas apontam o surgimento de novos modelos de negócios com entrega de encomendas compartilhadas, com transporte de passageiros, com utilização de plataformas ou aplicativos de entrega, ampliação dos serviços de *delivery* em larga escala, decorrentes do crescimento do comércio eletrônico;
- d. O sistema rodoviário associado com o uso de veículos automotivos é o serviço com maior predominância nos estudos sobre roteirização para coleta e entrega de encomendas, tendo sido identificada oportunidade de pesquisa em relação ao modal hidroviário;
- e. Observou-se a preocupação em utilizar ferramentas de simulação confiáveis e validadas cientificamente para respaldar os métodos de otimização, principalmente, devido à dificuldade de implementação de casos práticos reais, seja pela restrição de acesso devido ao sigilo industrial ou pelo risco que envolve uma simulação em um ambiente real.

Com base nas respostas às perguntas de pesquisa deste estudo, verifica-se que, apesar do tema roteirização já ter sido amplamente debatido na literatura, há oportunidades para pesquisas futuras, dentre as quais podemos destacar a necessidade de mais estudos baseados em casos práticos, principalmente no segmento da indústria 4.0, incluindo desenvolvimento de novos modelos de otimização que considerem as restrições de tempo, distância, capacidade e utilização de mais de um tipo de veículo, permitindo a simulação de um processo semelhante ao que ocorre na vida real. Outra questão de grande relevância a ser explorada é a necessidade de inclusão do modal hidroviário nos estudos sobre otimização.

2.2 ALGORITMOS GENÉTICOS

Os algoritmos genéticos (AG) são metaheurísticas baseadas na teoria de seleção natural de Charles Darwin, no século XIX, no qual se afirmava que apenas os indivíduos com maior capacidade de adaptação conseguem sobreviver e transmitir os seus genes para as gerações futuras (DARWIN, 1859).

Nessa perspectiva, o AG foi desenvolvido por Holland (1975) utilizando os conceitos da biologia evolutiva com cromossomo, mutação, gene e seleção para resolver problemas de otimização por meio de métodos computacionais avançados (HOLLAND, 1975; CAMPELO JUNIOR, 2010).

Os algoritmos genéticos possuem uma função objetivo chamada de função de aptidão ou fitness, que é responsável por avaliar cada uma das soluções obtidas geradas pela técnica de otimização. O processo começa com geração de uma população inicial de indivíduos que pode ser desenvolvida de forma aleatória ou de estruturada, representando possíveis soluções de um determinado problema (BAKER e AYECHER, 2003).

A aptidão de cada indivíduo é avaliada durante o processo de evolução, resultando em indivíduos aptos e menos aptos. Após esta etapa alguns candidatos são selecionados para reprodução. Então novos indivíduos são gerados através do cruzamento, surgindo uma nova população. Esse mesmo processo é reiniciado exaustivamente até que a solução otimizada ou o número de iterações seja alcançado (MICHALEWICZ, 1996).

Dessa forma, cada nova geração é submetida a uma função de avaliação para medir a aptidão dos indivíduos, afim de obter resultados melhores que se aproxime do valor ótimo. Também é necessário estabelecer um critério de parada para as iterações que pode ser a convergência para um indivíduo mais apto ou a definição de um limite de tempo ou de iterações.

De acordo com Malaquias (2006), o algoritmo genético probabilístico mantém a cada iteração t , uma população de indivíduos $P(t)$:

$$P(t) = (p_1^t, p_2^t, \dots, p_n^t)$$

Esse cromossomo p^t representa uma solução do problema proposto. A cada iteração t ocorre um processo de renovação da população, obtendo $P(t)$ a partir de $P(t-1)$. Em seguida, esse indivíduo é avaliado por uma função que mede o nível de aptidão do AG. Com isso, os

indivíduos considerados mais aptos sobrevivem e são preservados para a população seguinte, enquanto que os menos aptos foram descartados.

Durante a programação genética ocorre um processo de renovação das populações que visa melhorar geneticamente cada indivíduo. A partir de uma população inicial definida, pais são selecionados para a reprodução, gerando filhos que passam a sofrer mutação e, em seguida, são adicionados a população.

Os cromossomos, por sua vez, podem ser representados de forma inteira, binária e real (MALAQUIAS, 2006). Apesar de a representação binária ser a mais utilizada, os números inteiros serão os genes adotados nesta pesquisa por serem mais fáceis de aplicar em um sistema real. Por exemplo, a representação por inteiros pode ser utilizada para resolver problemas de otimização combinatória, como é o caso do problema do caixeiro viajante.

Dessa forma, o cromossomo é representado por um vetor de inteiros no qual cada número está relacionado a uma sequência de cidades a serem percorridas pelo caixeiro viajante, conforme a expressão a seguir:

$$p = (0\ 4\ 6\ 3\ 1\ 5\ 2\ 9\ 8\ 7\ 0)$$

2.2.1 Parâmetros do Algoritmo Genético

De acordo com Malaquias (2016) para que os algoritmos genéticos possam encontrar uma solução ótima é necessário considerar os seguintes parâmetros:

- Função de aptidão – representa a função objetivo, responsável por avaliar o nível de aptidão de cada cromossomo gerado pelo GA;
- População inicial – é o espaço de busca do GA no qual a população é avaliada pela função de aptidão para verificar a qualidade da solução;
- Operadores genéticos – possui a tarefa de renovar a população de forma iterativa, a fim de melhorar a qualidade genética de cada indivíduo, podendo ser utilizado dois tipos de operadores: *crossover* (cruzamento) e mutação.
- Cruzamento – é a primeira etapa na formação de uma nova população, constituída pelos filhos gerados a partir da escolha de pares de indivíduos. Na fase de seleção, a probabilidade de seleção desse indivíduo deve ser proporcional à sua aptidão. Através de um dos métodos da roleta russa, um dos mais conhecidos e utilizados, no qual uma população é representada por uma roleta dividida em n regiões que ao ser girada indica quais os indivíduos foram selecionados através da posição de cursores. Em seguida, ocorre o processo de cruzamento entre dois ou mais pais que consiste em obter cortes nesses cromossomos nos quais tem a suas metades permutadas para formarem novos filhos que são adicionados à população.
- Mutação – é um mecanismo fundamental para evitar que o algoritmo encontre uma solução mínima local. É por meio da mutação que é possível explorar outras regiões do espaço de busca. Dessa forma, os operadores de mutação por meio de

uma função de probabilidade provocam uma mudança aleatória nos genes do cromossomo, formando um novo indivíduo.

- Elitismo – é método que garante a preservação dos melhores indivíduos no processo de transição entre gerações, a fim de evitar a perda de qualidade dos indivíduos que povoarão a população atual. O elitismo, por sua vez, faz a substituição dos indivíduos com menor aptidão pelos melhores cromossomos da nova população.

Neste estudo, foi adotado o método metaheurístico baseado em Algoritmo Genético para a solução do problema de roteirização através de uma representação por inteiros associada a otimização combinatória com parâmetros reais por apresentarem um desempenho satisfatório. Em contrapartida a codificação binária, de acordo com a literatura, tem apresentado um baixo desempenho em diversas aplicações práticas (MICHALEWICZ, 1996; MALAQUIAS, 2006).

2.3 GEOREFERENCIAMENTO

O georreferenciamento é um processo de grande importância no tratamento da informação geográfica, pois está relacionado diretamente com a qualidade cartográfica. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2011), os sistemas de Referência Terrestre ou Geodésico são utilizados para identificar a localização exata de qualquer ponto na superfície da Terra, tendo como principal referência espacial a posição obtida por meio de coordenadas geográficas.

Para localização e cálculo das distâncias entre cidades ou pontos de referência para uma análise mais precisa é importante considerar as vias reais de acesso, para isso, pode-se utilizar um Sistema de Informações Geográficas (SIG) que fornece as coordenadas essenciais para o cálculo de matriz de distâncias. Há possibilidade ainda de simplificação da representação gráfica através de um plano cartesiano baseado em distâncias lineares. Neste caso, de acordo com Malaquias (2006), será necessário utilizar o teorema de Pitágoras para calcular a distância entre dois pontos dada a fórmula:

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

Dentre os vários tipos existentes de Sistema de Coordenadas que tem a função de determinar com precisão a posição de um ponto sobre a superfície terrestre, destaca-se o Sistema de Coordenadas Esférico ou Geodésico como um dos mais utilizados, pois permite configurar a Terra como uma superfície quádrica em três dimensões por meio de um modelo

matemático que utiliza a rotação de uma elipse ao redor de um eixo menor e cuja unidade de medida é a angular (IBGE, 1999).

O conceito de Latitude Geográfica é definido como o arco contado sobre o meridiano da posição e que vai do Equador até o lugar especificado. A Latitude Norte ou Positiva é medida no sentido norte, quando medida no sentido Sul passa a ser chamada de Latitude Sul ou Negativa. Sua variação é de: 0° à 90° N ou 0° à $+90^\circ$; 0° à 90° S ou 0° à -90° (IBGE, 1999).

Entende-se por Longitude Geográfica como o arco contado sobre o Equador e que vai de Greenwich até o meridiano do lugar. A longitude Oeste de Greenwich (W Gr.) ou Negativa pode ser contada no sentido Oeste, enquanto que a Longitude Leste de Greenwich (E Gr.) ou Positiva pode ser contada no sentido Leste. A variação é de: 0° à 180° W Gr. ou 0° à -180° ; 0° à 180° E Gr. ou 0° à $+180^\circ$.

Para Schowengerdt (2007), os avanços científicos favoreceram o aperfeiçoamento dos métodos de georreferenciamento no que se refere ao processamento digital de imagens, resultando no surgimento de alguns termos como Geocodificação que é um processo de conversão de um endereço (formando por rua, número, bairro, CEP e cidade) em um sistema de coordenadas.

Assim, o processo de georreferenciamento deve ser executado com qualidade, levando-se em consideração os critérios de exatidão e precisão que são fundamentais para garantir a confiabilidade dos resultados e das métricas utilizadas neste estudo. Dessa forma, faz-se necessário comparar as coordenadas por amostragem para identificar possíveis divergências na localização entre o alvo mapeado e o seu posicionamento real. Felizmente, todo esse processo nos dias de hoje pode ser realizado de forma automatizada através de API's e com aplicações geocodificação na nuvem.

2.4 O PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) foi o primeiro caso de roteirização a ser estudado na literatura com a proposta de encontrar a melhor sequência para um conjunto de cidades a serem visitadas por um vendedor uma única vez e com a menor distância possível. Esse conceito surgiu, através de um jogo desenvolvido por Willian Rowan Hamilton no qual era necessário encontrar a melhor rota por meio dos vértices de um dodecaedro, com a condição que a localização do depósito de origem e destino deveria ser a mesma e cada ponto só poderia ser visitado uma única vez (APPLEGATE, 2006). Desde então, novas restrições têm sido

acrescentadas dando origem a novas variações como o Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes que incluem restrições adicionais de capacidade (DANTZIG e RAMSER, 1959; CAMPELO JUNIOR, 2010).

Na literatura são encontrados outros tipos de PCV, conforme descrevem Goldberg e Luna (2005) a seguir:

- PCV Simétrico – as distâncias de ida e volta são iguais, resultando numa matriz de custos simétrica.
- PCV com Janelas de Tempo – o tempo de percurso entre nós está associado a um determinado intervalo de tempo, conhecido como janela de tempo.
- PCV Estocástico – é um modelo baseado na atribuição de probabilidades para as variáveis como janelas de tempo, vértices, tempos e custos das arestas.
- PCV Periódico – envolve uma percorrida diária do caixeiro em um determinado número de dias, podendo um ponto ser visitado mais de uma vez, desde que não seja no mesmo dia.
- PCV com Coleta – esse modelo está baseado numa programação de coleta e entrega de produtos, considerando a capacidade do veículo e a distância mínima percorrida.
- PCV com Alvos Móveis – consiste em atender um conjunto de alvos móveis com início e término no mesmo ponto de partida numa determinada velocidade.
- PCV Bipartido – um circuito hamiltoniano de custo mínimo é determinado sobre um grafo ponderado que começa em um nó azul, sendo os demais nós vizinhos de cores diferentes.

Para Assad *et al.* (1988), abordagens exatas não são eficientes na resolução de problemas complexos, pois existem limitações que inviabilizam esse método, como é o caso do clássico problema do caixeiro viajante que possui ordem de complexidade exponencial, isto é, exigem um alto esforço de processamento computacional que cresce exponencialmente na proporção em que o problema aumenta (ver Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Tempos computacionais fatoriais para a resolução do caixeiro viajante

n	Rotas por segundo (em milhões)	(n-1)!	Cálculo total
5	250	24	Insignificante
10	110	322880	0,003 segundos
15	71	87 bilhões	20 min
20	53	$1,2 \times 10^{17}$	73 anos
25	42	$6,2 \times 10^{23}$	470 milhões de anos

Fonte: Conte (2002).

O grande problema do caixeiro viajante é o acentuado número de possibilidades de caminhos que aumenta de forma exponencial, conforme cresce o número de cidades. A Tabela 2.2, demonstra que é inviável a utilização de métodos exatos para a busca da melhor solução. Diante desse contexto, os métodos metaheurísticos adotados nesta pesquisa por meio de algoritmos genéticos suprem essa necessidade.

Tabela 2.2 – Dimensão de possibilidades em relação ao número de cidades do caixeiro viajante

Número de cidades	Número de rotas
3	1
4	3
5	12
6	60
7	360
8	2.520
9	20.160
10	181.440
11	1.814.400
12	19.958.400
13	239.500.800
14	3.113.510.400
15	43.589.145.600
16	653.837.184.000
17	10.461.394.944.000
18	177.843.714.048.000
19	3.201.186.852.864.000
20	60.822.550.204.416.000

Fonte: Malaquias (2006)

2.5 O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS

O Problema de Roteamento de Veículos (PRV) também amplamente estudado para diversas aplicações, tem um objetivo semelhante ao PCV e, também, pertence a classe de problemas NP-difíceis, porém, com algumas variações. Neste caso, o vendedor é substituído por vários veículos de modo a obter o custo mínimo de transporte sem exceder a capacidade de carga do veículo. (TOTH e VIGO, 2002).

Uma definição é dada por Laporte (1992) que descreve o PRV como um problema de programação de rotas ótimas de coleta ou entrega de um ou mais depósitos para um conjunto de cidades ou clientes geograficamente dispersos, sujeitos a diversas restrições. Nesse contexto, Goldbarb e Luna (2005) apresentam as principais entradas do PRV, a saber: os clientes atendidos por depósitos, a demanda, o tamanho da frota e o tipo de veículo empregado.

2.5.1 O Problema de Roteamento de Veículos Capacitados

O Problema de Rotamento de Veículos Capacitados (PRVC) cuja a nomenclatura em inglês é descrita como *Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)* é uma das diversas variantes do PRV, conforme abordado no capítulo 2. Este tipo de PRV possui uma frota formada por um conjunto de veículos que pode ser tanto homogênea (capacidades semelhantes) quanto heterogênea (capacidades diferentes), tendo como objetivo central buscar a distância mínima a ser percorrida pela frota (SILVA JÚNIOR, 2017).

Neste estudo foi elaborado uma solução para o PRVC que verifica simultaneamente as restrições de capacidade e distância das rotas. De acordo com Toth e Vigo (2002), o modelo matemático para o CVRP pode ser escrito da seguinte forma:

$$\text{Função Objetivo: } \min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij}$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \setminus \{0\}, \quad (1)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0} = K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \geq v(S) \quad \forall S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset \quad (5)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \in V \quad (6)$$

As restrições (1) e (2) garantem, respectivamente, que para cada vértice $i \in V$, sendo que i e j representam os clientes, existindo somente uma ligação de chegada e saída. As restrições (3) e (4) impõem, respetivamente, o grau de entrada e saída do vértice que representa o CD, que é igual a quantidade de veículos que são utilizados para atender a demanda dos clientes. A restrição (5) garante que nenhuma rota irá exceder a capacidade do veículo Q , assim como possibilita a conectividade da solução. A restrição (6) indica que x_{ijk} é variável binária, ou seja, só pode assumir o valor de 0 ou 1.

Neste aspecto, os problemas de otimização combinatória que envolvem o processo de roteirização proposto nesta pesquisa são modelados de acordo com a função objetivo e um conjunto de restrições no qual se pretende minimizar a distância e o tempo, levando em consideração a capacidade do veículo (MALAQUIAS, 2006). Com isso, a resposta esperada será o resultado Ótimo Global, ou seja, o melhor valor possível atribuído às variáveis que não viole as variáveis de decisão definidas nas regras de negócio.

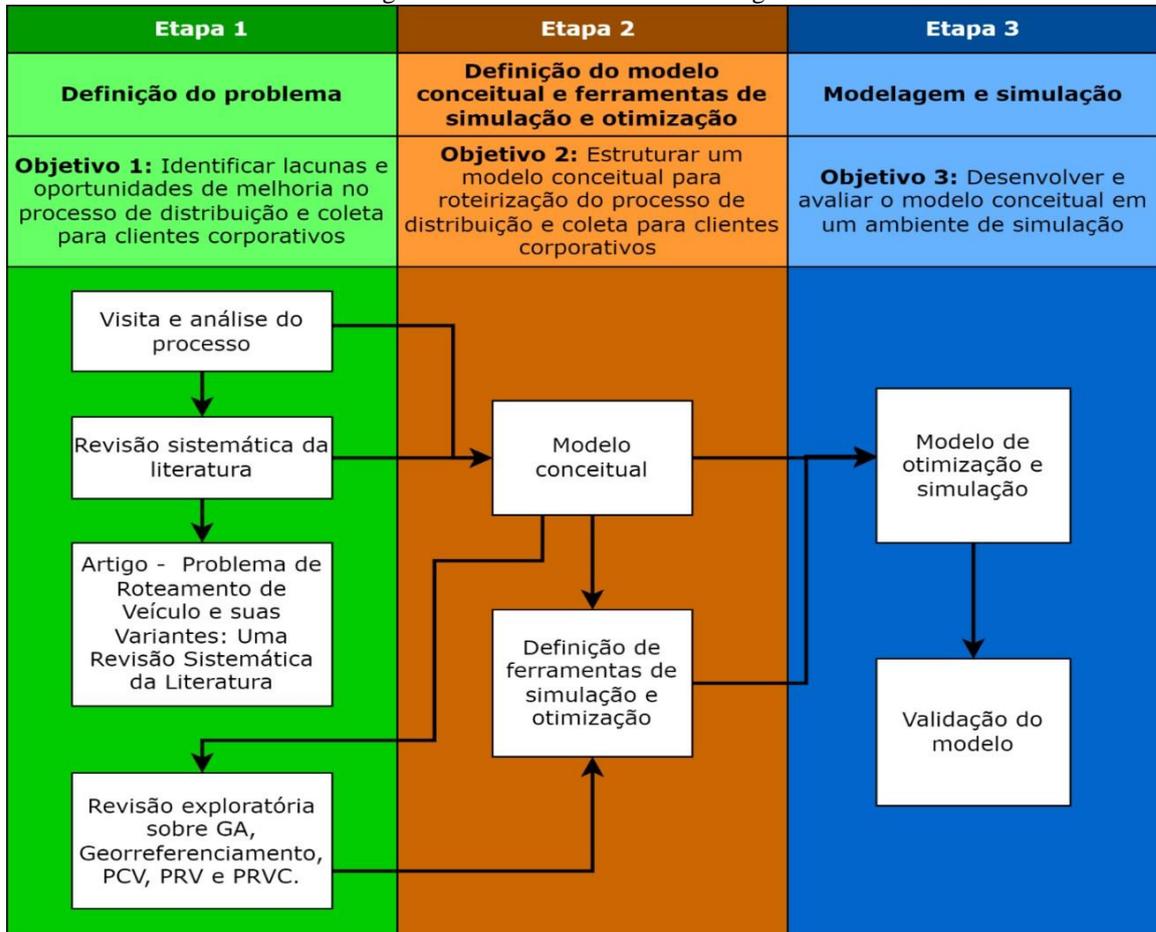
Os problemas de roteirização no que refere as demandas podem ser classificados com base no conhecimento em roteamento clássico quando as demandas são conhecidas antecipadamente ou em roteamento dinâmico quando as demandas surgem ao longo do expediente, sendo imediatamente inseridas nos roteiros em tempo real (BODIN, 1983). Para o problema de roteirização e programação de veículos desta pesquisa, considerou-se que as demandas de entrega e/ou coleta são conhecidas antecipadamente.

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são abordadas as etapas e procedimentos metodológicos (Figura 3.1) para a construção de um modelo de otimização de rotas para as linhas de coleta e/ou entrega nos serviços prestados por uma empresa de *courier* ao setor industrial. Assim, pretende-se utilizar um sistema de roteirização por meio de algoritmos que auxiliem o gestor no gerenciamento da frota e na tomada de decisão com o propósito de reduzir custos operacionais e desperdícios, otimizar os recursos existentes e monitorar a operação de coleta e distribuição de carga entre as unidades de distribuição e os grandes clientes, garantindo dessa forma, um melhor aproveitamento e disponibilidade de veículos para o atendimento da operação logística.

Figura 3.1 – Procedimento metodológico



3.1 ETAPA 1: DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

3.1.1 Visita para Análise do Processo

Inicialmente fez-se uma sondagem em uma empresa de *courier* para identificação de lacunas, gargalos ou problemas na operação. Durante visita e conversa informal com gestores, foi sugerido, de forma empírica e por necessidade da empresa, analisar o setor de distribuição como um ponto crítico para o negócio e com oportunidades de melhoria. Neste sentido, Cauchick Miguel *et al.* (2012) assegura que visitas ao chão de fábrica também são importantes para verificar *in loco* e/ou *in modus operandis*, o fenômeno estudado.

Dentre as diversas etapas que envolvem a logística, optou-se em delimitar o escopo deste estudo para o processo de roteirização com possibilidade de otimização do serviço de distribuição e coleta de encomendas para empresas de porte industrial. No processo executado por meio das rotas de coleta e/ou entrega (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), os clientes que possuem contrato, estabelecem a frequência para a coleta das encomendas.



O processo se inicia com a necessidade do cliente enviar os seus produtos por meio de um operador logístico, que tem a responsabilidade de fazer a coleta diária de acordo com a frequência contratada. Essa atividade, conforme o fluxo representado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, é executada de duas formas: (i) a empresa realiza a coleta e/ou distribuição dos objetos de forma descentralizada, utilizando as unidades de transferência de carga, que são pontos com localização próxima a um determinado grupo de clientes; (ii) o operador logístico realiza a coleta diretamente no cliente. Dessa forma, o Centro de Tratamento e Distribuição (CD) faz a programação das rotas a serem distribuídas entre os motoristas, considerando a quantidade e capacidade limitada de veículos que saem do CD para fazer a coleta e/ou distribuição entre esses pontos e precisam retornar para o mesmo CD até às 12 horas, a fim de que a carga seja tratada e encaminhada de acordo com janela de tempo da aeronave que levará a carga até o próximo destino.

As informações referentes aos distritos, veículos e as rotas são cadastradas no sistema da empresa por um técnico responsável por fazer o planejamento das rotas e manter a carga de trabalho equilibrada entre os motoristas. Cabe destacar que esse processo é feito sem o auxílio de recurso computacional avançado e com base nessa programação, é definido o tempo para

execução de cada rota e a quantidade de veículos necessários para a operação. Na sequência, é feito o embarque da carga diária a ser distribuída nesses mesmos pontos que possuem demandas de coletas, conforme a capacidade do veículo. Assim, cada motorista recebe as informações da rota via sistema e segue o percurso que acredita ser o melhor com base na experiência devido estar habituado a um determinado distrito.

3.1.2 Revisão Sistemática da Literatura

Existem muitas referências em diversas bases de pesquisa sobre esse assunto, porém, estão dispersas e demandam um tempo significativo para encontrá-las, por isso, houve a necessidade de elaboração de uma revisão sistemática da literatura para melhorar a organização deste estudo, utilizando-se as bases da Scopus e Web of Science. A cerca disso, Cauchick Miguel *et al.* (2012) afirma que existe a necessidade de definição de questões norteadoras da pesquisa, provenientes das lacunas identificadas na literatura.

Conforme já apresentado no capítulo 2, o referencial teórico dessa pesquisa foi construído a partir de uma revisão sistemática de literatura na qual procurou-se responder a 5 questões de pesquisa a respeito do PRV e suas variantes, seguindo a metodologia PROKNOW-C, desenvolvida pelo LABMCDA, descrita por Afonso *et al.* (2011), possibilitando a escolha de artigos de forma mais assertiva, rigorosa e específica, eliminando redundâncias e subjetividades. Nessa direção, Rowley e Slack (2004) afirmam sobre a importante contribuição da revisão da literatura ao identificar e organizar os conceitos encontrados em trabalhos relevantes, tendo como objetivo captar o estado-da-arte de um campo do conhecimento.

Esta revisão sistemática de literatura identificou oportunidades para o desenvolvimento de pesquisas com casos práticos reais para otimização de rotas de coleta e entrega de encomendas por *courier*, definindo o problema de pesquisa: PRV. Além disso, a execução dessa etapa de pesquisa resultou na publicação do artigo “Problema de Roteamento de Veículos e suas Variantes: uma revisão sistemática da literatura” (BATISTA e UHLMANN, 2022).

3.1.2 Revisão Exploratória da Literatura

Durante este estudo, foi identificada a necessidade de buscar mais informações na literatura por meio de uma revisão exploratória sobre algoritmo genético, apontado na pesquisa como uma das ferramentas mais utilizadas para resolver problemas de otimização de rotas. Outro assunto relevante é o clássico Problema do Caixeiro Viajante e demais variantes, como o Problema de Roteamento de Veículos, tendo sido pesquisados os conceitos sobre

georreferenciamento, técnicas de modelagem e metodologias empregadas em casos práticos reais. Conforme afirma Melo et al. (2016) na academia pode ser encontrada uma variedade de tipos de PRV, cada um com suas especificidades, todavia, apesar da sua vasta utilização, a variante que mais se aproximou da realidade vivida pela empresa analisada foi o Problema de Roteirização de Veículos Capacitados (PRVC), que foi o método escolhido por melhor representatividade para efeito de modelagem do processo logístico para coleta e/ou entrega de encomendas.

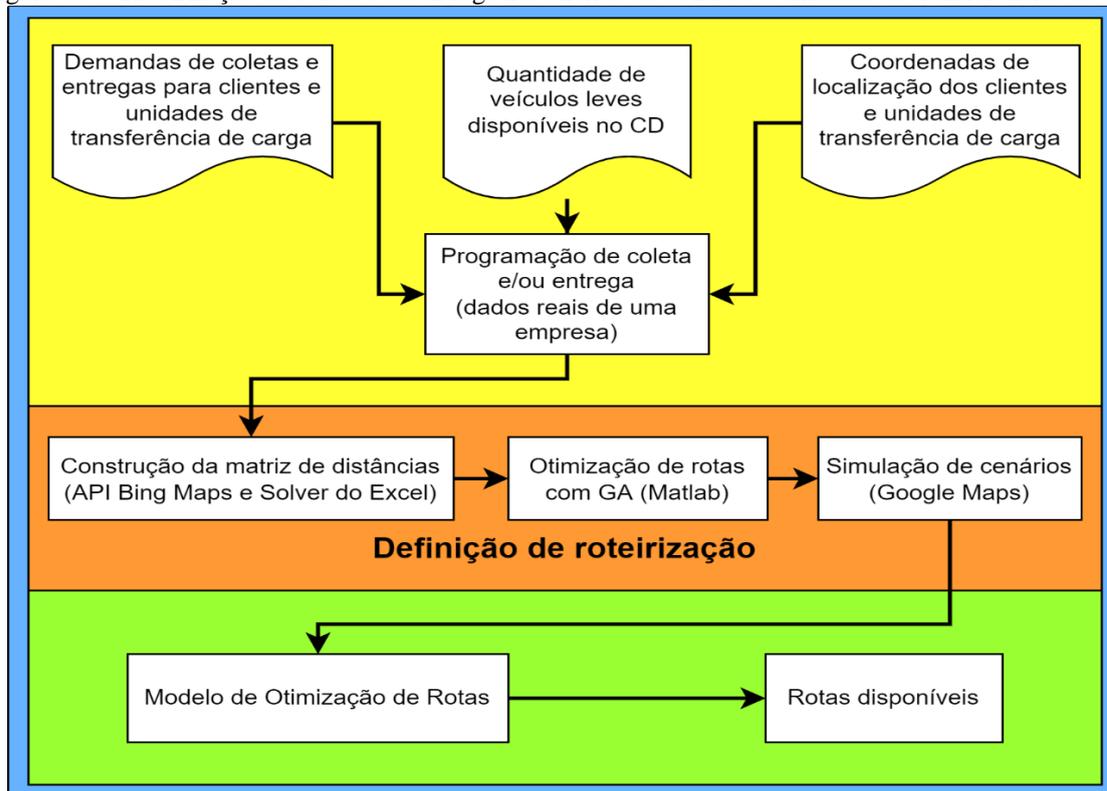
3.2 ETAPA 2: DEFINIÇÃO DO MODELO CONCEITUAL E FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

3.2.1 Modelo Conceitual

Na concepção de Cauchick Miguel *et al.* (2012) a construção de um modelo conceitual deve basear-se, inicialmente, apenas em uma fração das variáveis que definem um sistema real para, em seguida, ser abstraído em um modelo matemático analítico ou em um modelo experimental de simulação.

O modelo conceitual do sistema, é apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, representando o processo de um operador logístico que faz coleta e entrega de encomendas para clientes do setor industrial.

Figura 3.3 – Roteirização da coleta e/ou entrega nos clientes de contrato e unidades de transferências de carga



O modelo conceitual ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, representa o sistema real do processo de coleta e entrega de encomendas de um operador de logístico que possui uma obrigação contratual para coleta e entrega de produtos para indústria. O modelo de definição de roteirização proposto deve ser capaz de atender a demanda por meio da programação das linhas de transporte, levando-se em consideração as restrições de distância, tempo, quantidade e capacidade dos veículos disponíveis. O algoritmo irá definir a rota ótima em relação ao menor custo possível e, em seguida, a rota é programada e disponibilizada ao motorista.

3.2.2 Definição de Ferramentas Simulação e Otimização

De acordo com Cauchick Miguel *et al.* (2012), um modelo é uma representação de uma situação ou realidade, sendo construído de forma simplificada e com elementos essenciais idênticos ao sistema real que podem ser tratados através de métodos de análise e resolução conhecidos. Quanto a simulação computacional, para esses mesmos autores, é uma importante ferramenta de planejamento para emulação de sistemas reais, geralmente, difíceis de serem modelados matematicamente, visando analisar o seu comportamento sob diferentes cenários.

O modelo de otimizado e simulação foi implementado no Matlab na versão R2016a ((9.0.0.341660). Para a construção da matriz de distância foi utilizado o solver Excel e pelas APIs do Bing Maps e Google Maps, através dessas ferramentas foi possível avaliar suposições e projetar experimentos em diferentes cenários, aplicando-se a otimização em conjunto com a simulação, na qual o otimizador irá medir a saída do modelo e gerar um novo conjunto de parâmetros de entrada com base em dados de um sistema real, objetivando atingir o melhor resultado.

No processo de definição de roteirização, a melhor solução deve ser desenvolvida com base no PRV, levando-se em consideração as restrições aplicáveis as empresas de *courier* como, distância, tempo e capacidade de veículo. Para isso, pretende-se implementar algoritmos genéticos na busca da solução otimizada para o serviço de coleta e entrega de encomendas nos clientes corporativos, seguindo as teorias de Muslu e Dogan (2020) relatadas no capítulo 1 e ratificadas por outros autores (COSTA *et al.*, 2018; KUKARTSEV *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2019; PENG *et al.*, 2019; SYAUQI e ZAGLOEL, 2020; URQUHART, HOEHL e HART, 2019; ZHAO *et al.*, 2019; ZHU, LEE e WANG, 2021) citados no capítulo 2 deste estudo, no qual o AG é apontado como uma alternativa eficiente nos ambientes de modelagem e simulação de rotas.

3.3 ETAPA 3: SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

3.3.1 Simulação e Otimização do Modelo Conceitual

Para Grigoryev (2015) a modelagem é um método eficaz de resolver problemas sem correr riscos, no qual é possível realizar testes sob diversas condições, comparar cenários e otimizar processos que podem, posteriormente, serem mapeados para o mundo real. Segundo esse mesmo autor, as principais vantagens da modelagem de simulação são: permitir a análise sistemas e encontrar soluções onde os métodos tradicionais falham; o processo de desenvolvimento é escalável, incremental e modular; a medição de valores e análises estatísticas pode ser feita a qualquer momento; a capacidade de executar e animar o comportamento do sistema no tempo para demonstração, apuração e depuração. Em síntese, um dos grandes benefícios da simulação é a capacidade de lidar com problemas complexos, determinísticos ou estocásticos, sem sofisticação matemática (FIGUEIRA e ALMADA-LOBO, 2014).

Os testes do algoritmo de otimização foram processados em ambiente de modelagem e simulação, considerando os dados reais do objeto de estudo, os quais serão aplicados em uma base de dados georreferenciada. O algoritmo calcula a rota ótima, considerando as variáveis tempo, distância e capacidade do veículo.

O método de modelagem adotado nessa pesquisa é classificado como eventos discretos, implementado pela primeira vez em 1961 pelo engenheiro Geoffrey Gordon da International Business Machines Corporation (IBM). Considera-se esse método adequado para essa pesquisa devido o modelo ser especificado com um fluxograma de processo onde blocos representam uma sequência de operações a serem realizadas (GRIGORYEV, 2015).

Foi proposto um modelo de otimização de rota de baixo custo para o centro de distribuição de uma empresa logística, baseado em algoritmo genético para a solução do PRV. Com isso, um determinado número de clientes precisa ser atendido por uma central de distribuição que dispõe de um número limitado de veículos para fazer a coleta e/ou entrega de mercadorias.

No modelo de roteirização desenvolvido foi considerado as seguintes premissas:

- Em cada parada pode ser executada tanto a coleta quanto a entrega de objetos;
- Utilização de veículos homogêneos com capacidade limitada de peso e volume;
- A janela de tempo não pode ultrapassar a carga horária de 8 horas de serviço;
- Apenas um veículo deve visitar o endereço uma única vez;

- Calcular a melhor rota em relação à distância, tempo e capacidade do veículo, de forma que o custo seja o mínimo possível;
- Definir a quantidade de veículos necessária para atender a demanda.

3.3.2 Validação do Modelo

Nesta etapa foram produzidos cenários em ambiente de simulação nos quais foi possível medir a distância e tempo de percorrida incluindo o tempo de parada para carregamento e descarregamento, comparando o desempenho do algoritmo com os dados reais coletados na empresa. Para fins de análise qualitativa e quantitativa foi considerada a mesma quantidade de endereços previstos para as rotas selecionadas, levando-se em consideração a capacidade do veículo.

Após o levantamento das coordenadas geográficas, fez-se a análise da solução otimizada por meio do Google Maps, colocando-se as coordenadas de latitude e longitude de cada ponto para a simulação das rotas, com isso, foi possível obter a distância e o tempo de percorrida entre o ponto inicial e o ponto final de cada rota de coleta e entrega, aplicando-se o meio de transporte “carro”, a fim de verificar perdas ou ganhos na operação.

CAPÍTULO 4

4 APLICAÇÃO PRÁTICA

Neste capítulo são demonstrados a construção do modelo de otimização e simulação e cenário desenvolvido considerando os dados reais de uma empresa logística que presta serviços de coleta e/ou entrega de mercadorias na cidade de Manaus.

4.1 CASO TESTE

Para um melhor entendimento da realidade presente no contexto da empresa em estudo, foi feita uma visita “*in loco*” para coletar de dados e conversar com os gestores do processo a fim de obter insights para a construção de uma solução prática para o problema de roteirização.

É importante salientar que a empresa aqui estudada atua no ramo de distribuição e de encomendas nacionais e internacionais e atende desde de clientes do varejo a clientes industriais na cidade de Manaus. Os clientes corporativos têm a opção de contratar um serviço de coleta programada cuja a empresa dispõe de uma frota que fica a disposição para esta finalidade. Para atender a uma frequência diária de segunda a sábado, a empresa tem a responsabilidade contratual de fazer as coletas dentro da jornada de trabalho dos funcionários e, em seguida, realizar o tratamento e encaminhamento ao destino. Esse processo de roteirização deve considerar a capacidade do caminhão que não pode ser ultrapassada.

Com base nas informações levantadas na pesquisa de campo, foi verificado que o processo de roteirização é feito de maneira artesanal com base na experiências dos técnicos da empresa analisada sem o auxílio de métodos computacionais de otimização. Observou-se que alguns veículos retornam cheios, porém não consegue coletar toda a carga do cliente, obrigando o motorista a retornar para coletar a carga residual; enquanto outros retornam com 50% da capacidade de carga utilizada.

Nesse contexto, foi definido um conjunto de requisitos para caracterização do problema de roteirização de veículos e especificação dos atributos do modelo desenvolvido, conforme a descrição abaixo:

- Caracterização do atendimento a demanda: coleta de objetos expressos com prioridade de atendimento até as 12 horas da manhã. Os demais produtos que tem não tem urgência são coletados no turno da tarde. O veículo somente deverá

retornar ao local caso não seja possível atender a demanda com um veículo de maior capacidade devido a algum tipo de restrição.

- Frota de veículos: um conjunto de 5 veículos com capacidade de 1200 kg e volume de 7,5 m³ para percorrer diariamente 19 locais partindo e retornando ao mesmo CD.
- Para efeito de mensuração da demanda foram considerados a cubagem do veículo e o valor médio de ocupação do veículo em cada ponto de coleta, obtidos de um sistema interno da empresa.

Um fator complicador em relação a demanda é que não existe uma previsão exata da quantidade de objetos a serem coletados no dia, a programação é feita com base no histórico de utilização do veículo. Esse problema se agrava quando surgem picos de demanda ou solicitações de coletas extras, decorrentes de datas comemorativas ou campanhas promocionais que geram aumento nas vendas, levando o gestor a recorrer a improvisação e a experiência do técnico responsável pelo setor de transporte para a tomada de decisão. Estas lacunas dificultam a administração da frota que precisa cumprir uma janela de tempo para executar as atividades de tratamento e encaminhamento da carga expressa, a tempo de serem despachadas no aeroporto.

Diante deste cenário, a solução viável encontrada foi utilizar esses dados extraídos do sistema interno da empresa no qual está registrado o percentual de utilização do veículo em cada ponto de distribuição e coleta. Dessa forma, foi possível obter o valor médio em metros cúbicos da quantidade coletada/ou distribuída em cada local, através do relatório de ocupação dos veículos, referente ao mês de julho do ano corrente.

Para fins de análise qualitativa e quantitativa foi considerada a mesma quantidade de endereços previstos para o distrito selecionado, levando-se em consideração a capacidade do veículo. Os endereços e os nomes dos clientes foram preservados devido ao sigilo profissional e substituídos por códigos.

Dado a complexidade do processo em estudo, as pesquisas mais recentes, conforme abordado no capítulo 2, apontam em direção ao uso de AG para resolver problemas de otimização de rotas que, neste caso, está relacionado ao problema de múltiplos caixeiros viajantes combinado com o problema de roteamento de veículo com restrições de capacidade e com base na cubagem.

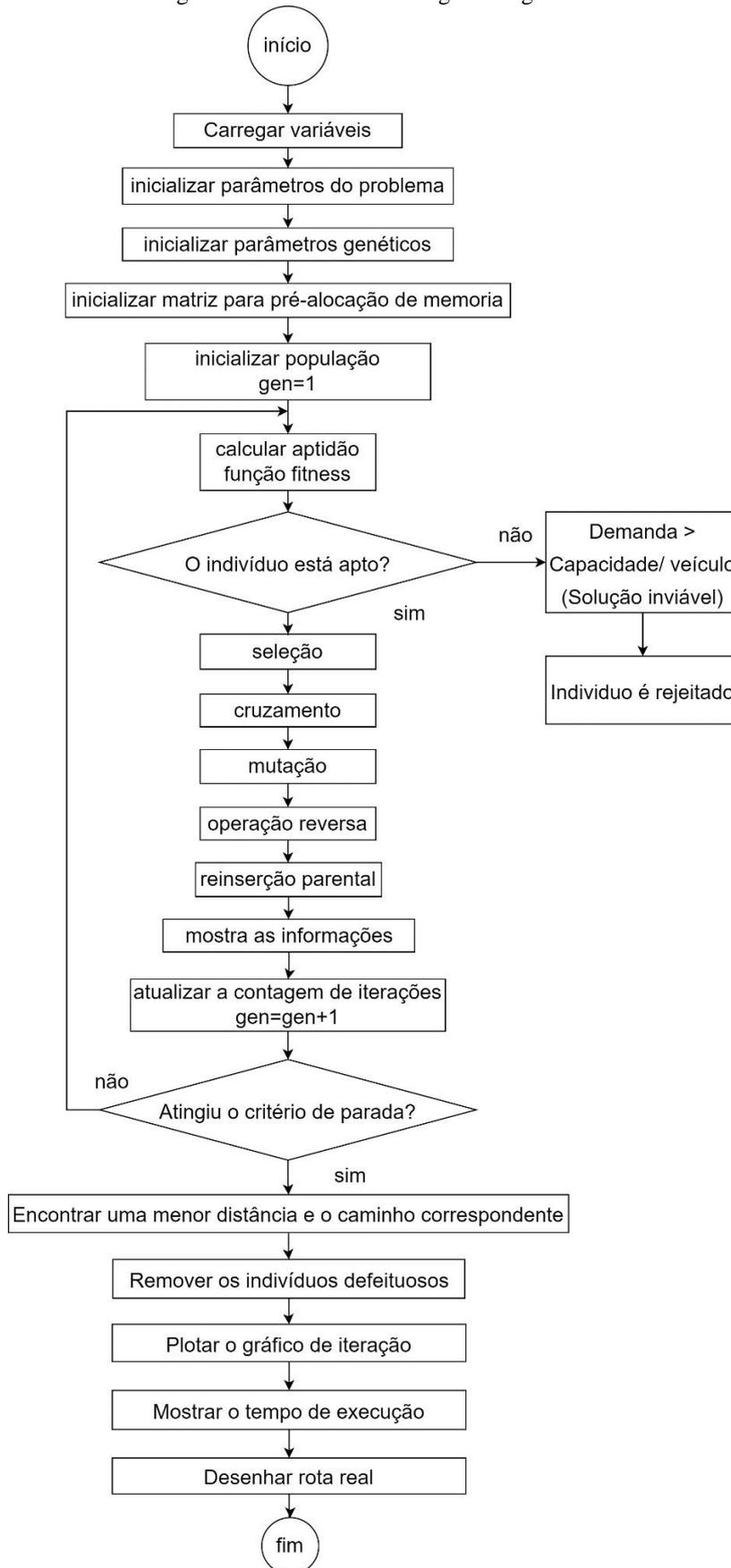
Para que a modelagem desse processo fosse possível, houve a necessidade de delimitação do campo de atuação, limitando-se a uma área contendo viaturas homogêneas, ou seja, com as mesmas características de capacidade. Também os trechos utilizados foram apenas do turno da manhã com programação de saída e chegada para o mesmo CD, no qual a carga precisa chegar até às 12 horas para ser tratada e encaminhada no mesmo dia.

4.3 PARÂMETROS DO ALGORITMO GENÉTICO

A lógica embutida no modelo proposto de roteirização e programação de veículos busca, primeiramente, minimizar a frota e, em seguida, reduzir a distância total percorrida. Então, para que os algoritmos genéticos fossem eficazes na resolução de problemas de otimização combinatória foi fundamental definir corretamente as variáveis de entrada, a fim de representar o sistema real de maneira fidedigna, porém, é uma tarefa complexa devido as restrições que estão presentes no processo analisado. Dessa forma, o processo foi simplificado e delimitado o campo de atuação.

A caracterização da programação genética está representada na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Parâmetros do algoritmo genético



Fonte: Adaptado de Malaquias (2006).

Na etapa de definição de variáveis do problema de roteirização foram inseridos os dados no Matlab, através do comando “load” conforme descrição abaixo:

- City – coordenadas de latitude e longitude dos pontos de coleta obtidas na base de dados da API do Google Maps;
- Demand – demanda prevista em cada local em metros cúbicos, baseado no sistema de monitoramento da empresa em estudo;
- Capacity – capacidade do veículo em metros cúbicos;
- Distance – distância real em km, extraída da base de dados da API do Bing Maps.

Para a implementação prática do AG foi necessário substituir as coordenadas lineares do Matlab entre os locais pelas distâncias reais percorridas pelas viaturas, a fim de melhorar a precisão das métricas utilizadas no cálculo das distâncias e possibilitar a implementação na empresa estudada para que fosse possível fazer uma melhor análise da performance do algoritmo. Portanto, para a localização do CD e dos pontos de coleta foram consideradas as coordenadas geográficas (latitude e longitude).

Tabela 4.1 – Matriz de distâncias

	CD	C1	C2	C3	C4	C5	C5A	C5B	C6	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18
CD	0	8	9	9	8	7	7	7	2	9	12	6	4	3	9	11	13	13	6	5
C1	8	0	2	2	6	4	4	4	9	4	7	4	9	7	14	16	19	14	4	4
C2	9	1	0	2	7	4	4	4	10	3	6	4	10	7	15	17	19	15	4	5
C3	10	2	2	0	8	5	5	5	11	3	6	5	11	8	16	17	19	14	5	6
C4	10	5	6	6	0	6	6	6	6	7	10	6	11	9	16	18	20	16	6	6
C5	4	5	5	6	6	0	0	0	5	7	10	4	5	3	11	12	15	10	4	1
C5A	4	5	5	6	6	0	0	0	5	7	10	4	5	3	11	12	15	10	4	1
C5B	4	5	5	6	6	0	0	0	5	7	10	4	5	3	11	12	15	10	4	1
C6	2	9	10	10	6	8	8	8	0	10	13	7	6	4	11	12	15	14	7	6
C8	10	3	3	4	8	5	5	5	11	0	3	3	8	8	16	18	16	11	4	6
C9	15	6	6	7	11	9	9	9	15	4	0	7	12	13	14	16	13	9	7	10
C10	7	4	5	6	7	3	3	3	9	4	6	0	5	6	12	13	14	10	2	4
C11	5	8	8	9	9	6	6	6	6	8	9	5	0	3	8	10	10	9	5	4
C12	2	7	8	8	8	6	6	6	3	8	11	5	3	0	8	10	12	12	5	3
C13	9	15	15	16	15	14	14	14	11	14	12	13	8	10	0	2	7	11	13	11
C14	10	16	17	18	17	15	15	15	13	15	13	11	8	11	2	0	6	10	14	13
C15	17	18	19	19	18	14	14	14	17	16	12	11	13	15	8	7	0	4	12	14
C16	13	13	14	15	14	10	10	10	14	11	9	8	10	11	12	11	6	0	9	11
C17	6	3	4	5	6	2	2	2	7	4	7	3	7	4	12	14	16	12	0	2
C18	5	3	4	5	6	2	2	2	6	6	11	5	6	4	11	13	16	11	2	0

O cálculo da distância foi obtido por meio da função “GetDistance” aplicada no solver do Excel. Uma chave de acesso foi habilitada, através da API do Bing Maps para consultar a

distância na nuvem de forma automatizada, considerando o fluxo de direção das vias, gerando uma matriz de distâncias, conforme se vê na Tabela 4.1.

Em relação aos parâmetros de inicialização do AG, foi utilizada a configuração da Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Parâmetros do GA

Variável	Valor
NIND	2000
MAXGEN	2000
GGAP	0.9
PC	0.9
Pm	0.05

A variável NIND recebe o tamanho da população, inicialmente utilizando o valor 60, porém, o algoritmo não apresentou um bom desempenho, por isso, foi ampliado o valor da variável para 2000 até que se observou uma estabilidade no desempenho do AG. Enquanto que a MAXGEN representa a máxima álgebra genética, ou seja, indica o limite máxima de iterações que o algoritmo pode atingir. É uma condição de parada imposta para evitar que o AG opere em um loop infinito caso não encontre um valor Ótimo Global.

Em relação aos índices de probabilidade de intervalo de geração (GGAP), de cruzamento (Pc) e mutação (Pm) a melhor combinação encontrada está registrada na Tabela 4.2. Esses operadores de cruzamento e mutação foram aplicados para recombinação das soluções, mudando de forma aleatória a variável de decisão e garantindo a diversidade da população. Também foi observado que a variação da probabilidade de mutação ao longo da execução não melhorou o desempenho do algoritmo. Em termos práticos, quando se aumentou a taxa de probabilidade de mutação, o algoritmo ficou instável, apresentando um baixo desempenho na solução gerada.

O varável “gen” recebe o valor da primeira geração e o AG calcula o comprimento da rota através da função “fitness”. O cálculo de aptidão faz a análise de cada cromossomo gerado pelo algoritmo através de uma função objetivo procura pela distância mais curta no histórico armazenado na memória e o caminho correspondente. O cromossomo, neste estudo caso, é representado por um conjunto numérico que simbolizam as rotas, por exemplo, pode-se dizer

que $R1 = [0\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\ 0]$ corresponde a um cromossomo que pode ser otimizado de acordo com a melhor sequência sugerida pelo AG. Quando o cromossomo ao ser avaliado apresenta uma demanda acima da capacidade do veículo é considerado inapto, recebendo uma penalidade de rejeição.

Com o surgimento de uma nova geração, a população é renovada com ajuda do operador de reinserção que introduz os indivíduos mais adaptados ao problema novamente no processo evolutivo. Conforme ilustrado na Figura 4.1, a interação entre as etapas de avaliação, seleção, reprodução e mutação é repetida até que a condição de parada seja satisfeita. Na execução do código foi observado uma estagnação do processo de busca, o que significa dizer que o AG convergiu para uma melhor solução e encerrou o ciclo de evolução, retornando o melhor indivíduo da população atual.

4.4 ANÁLISE DO RESULTADO

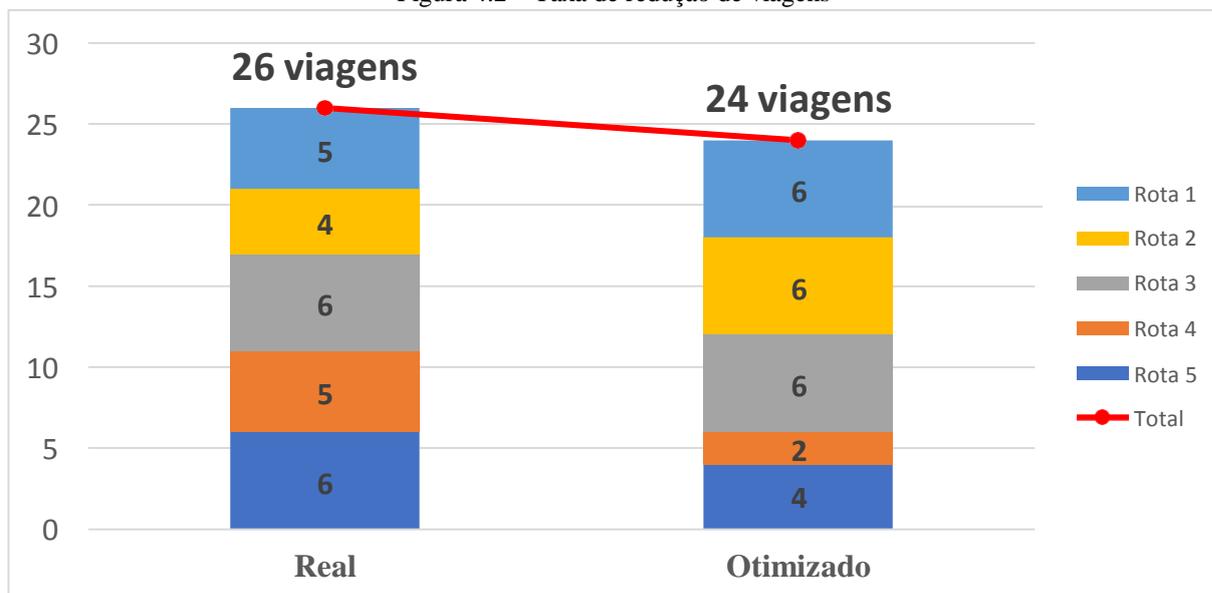
A partir do modelo que foi desenvolvido neste estudo, foi possível identificar o percentual da capacidade de utilização de cada veículo que está disponível para atender novas solicitações no período da manhã com base na série histórica, desde que os dados coletados correspondam a uma métrica fidedigna das informações registradas nos sistemas de controle e monitoramento da empresa. Esse conhecimento prévio da performance de cada veículo subsidiaria o gestor na tomada de decisão ao analisar a viabilidade de atender demandas extras dos clientes.

Durante os testes, foi possível observar o desempenho do GA, fazendo-se uma comparação entre a rota real utilizada pela empresa estudada e a roteirização proposta. Na figura 4.2, por exemplo, na rota 1, enquanto o veículo utilizou apenas 47% da capacidade percorrendo 5 percursos, após a otimização o mesmo veículo passou a utilizar 57%, conseguindo atender mais um ponto de coleta, ou seja, percorreu 6 percursos. Na rota 2, verificou-se que o veículo não coletou 100% da carga solicitada pelo cliente devido não ter mais espaço no veículo que ficou lotado com as coletas anteriores, sendo necessário retornar ao mesmo lugar, posteriormente, para recolher a carga residual, desperdiçando recursos da empresa, já que no retorno do veículo foi utilizado somente 35% da capacidade. Com a nova rota otimizada, esse problema foi resolvido de modo que o mesmo veículo retornou com 87% da capacidade, conseguindo atender mais clientes em uma única rota. Na rota 3, houve um aumento de 12% na utilização do veículo para o mesmo número de viagens. Na rota 4, constatou-se um aumento em 37% na utilização do veículo e redução significativa do número de viagens devido o cliente utilizar 100% da ocupação da viatura. Na rota 5, enquanto que o veículo precisou refazer a rota

para conseguir coletar toda a carga dos clientes, no modelo otimizado, foi observado que o mesmo veículo conseguiu atender a todos os clientes sem a necessidade de uma viagem extra.

Em geral, no modelo proposto o algoritmo identificou o problema e eliminou o percurso excessivo, reorganizando a programação e distribuindo as rotas para atender a demanda entre os veículos que tinham disponibilidade, de tal forma, que cada veículo passasse apenas uma única vez em cada ponto. Isso representou uma redução de 8% no número de viagens executadas pela frota, conforme demonstrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Taxa de redução de viagens

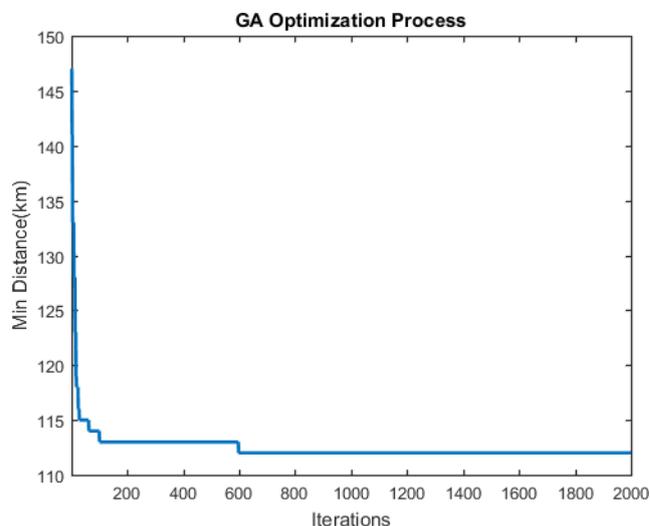


A otimização das rotas melhorou o tempo de atendimento e reduziu a distância dos percursos e número de viagens, pois, no sistema real os veículos não conseguiam coletar a totalidade da carga e teriam que retornar ao local, consumindo tempo, recursos e comprometendo o tempo de triagem e tratamento da carga para encaminhamento ao destino; enquanto outros veículos retornam ao CD com a capacidade abaixo da meta de 75% definida pela empresa. A única exceção ocorreu por conta da localização de um cliente está em área de shopping que possui restrições de altura e de acesso à via. Nesse caso, o recolhimento da carga é feito de forma fracionada, de modo que a viatura retorna ao local outras vezes devido a impossibilidade de atender essa demanda com um veículo de maior capacidade.

Para evitar a tendência que o algoritmo tem de encontrar um ótimo local, foi aumentado, propositamente, o número de iterações para se chegar a um melhor resultado possível que representasse o ótimo global. Na Figura 4.3, observa-se que a partir da iteração de número 600

o AG alcança a estabilidade e encontra uma distância mínima total de 112 km no período da manhã. Neste caso, a iteração de 101 até 597, apresenta uma distância de 113 km que na prática seria um ótimo local.

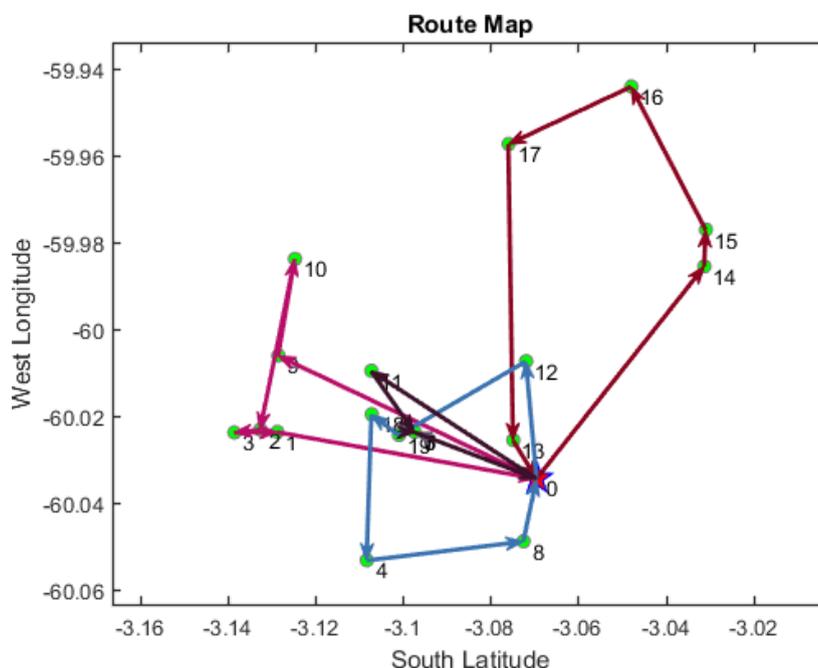
Figura 4.3 – Gráfico de iteração e distância



Fonte: Matlab (2022)

Ao atingir a condição de parada, gerando uma população de 2000 indivíduos o AG seleciona dos melhores indivíduos e plota o gráfico, apresentando a rota otimizada, conforme se observa na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Mapa das rotas otimizadas



Fonte: Matlab (2022)

A Figura 4.5 ilustra o resultado apresentado pelo AG que executou o código em 267 segundos e apresentou uma programação com 5 viaturas, das quais 4 estão com um índice de aproveitamento da capacidade do veículo acima de 80%.

Figura 4.5 – Resultado gerado pelo AG

Elapsed time is 267.589783 seconds.
 Total Distance = 112 km
 Best Route:
 0 -> 9 -> 10 -> 2 -> 3 -> 1 -> 0 -> 14 -> 15 -> 16 -> 17 -> 13 -> 0
 -> 12 -> 19 -> 18 -> 4 -> 8 -> 0 -> 5 -> 0 -> 11 -> 6 -> 7 -> 0

Route of Vehicle No.1: 0 -> 9 -> 10 -> 2 -> 3 -> 1 -> 0
 Distance traveled: 30.00 km, load rate: 57.33%;

Route of Vehicle No.2: 0 -> 14 -> 15 -> 16 -> 17 -> 13 -> 0
 Distance traveled: 34.00 km, load rate: 86.67%;

Route of Vehicle No.3: 0 -> 12 -> 19 -> 18 -> 4 -> 8 -> 0
 Distance traveled: 24.00 km, load rate: 94.67%;

Route of Vehicle No.4: 0 -> 5 -> 0
 Distance traveled: 11.00 km, load rate: 100.00%;

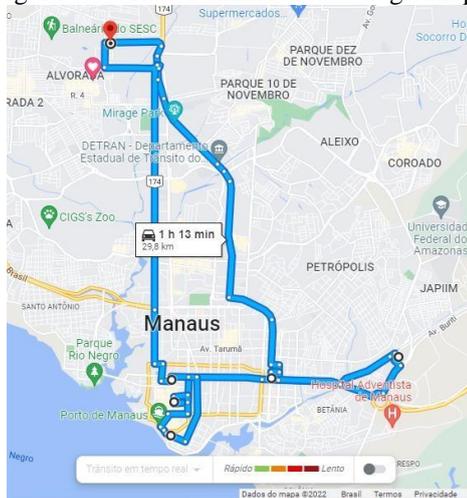
Route of Vehicle No.5: 0 -> 11 -> 6 -> 7 -> 0
 Distance traveled: 13.00 km, load rate: 85.33%;

Fonte: Matlab (2022)

Esse resultado expressivo foi confirmado na simulação do Google Maps, comprovando que houve redução da distância total e do tempo de execução, porém, para esse experimento não foram considerados fatores adversos como congestionamentos, acidentes, entre outros, apenas foram computados o tempo de carregamento do veículo em cada ponto.

A Figura 4.6 representa a simulação que foi realizada na Rota 1 através do Google Maps, indicando um tempo médio de 1 hora e 13 minutos para execução de um percurso de 29,8 km, considerando o trânsito livre. Quando foi acrescentado o tempo de parada em cada ponto de coleta, o tempo total da rota foi de 2 horas e 33 minutos.

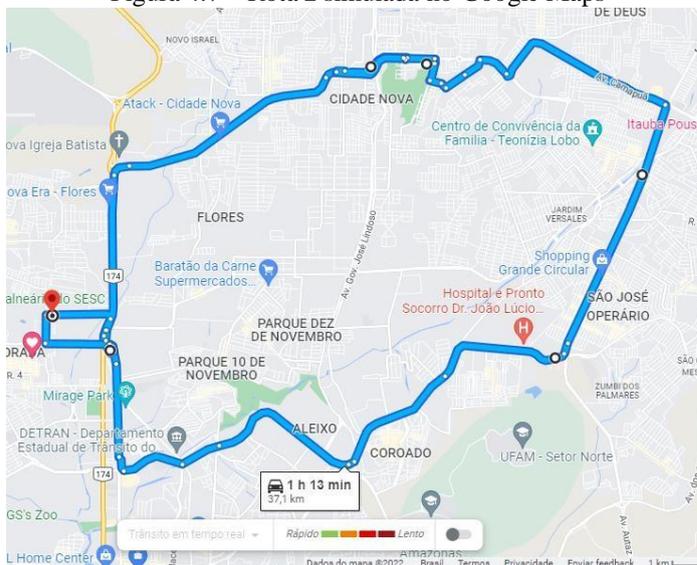
Figura 4.6 – Rota 1 simulada no Google Maps



Fonte: Google Maps (2022)

A simulação da Rota 2, conforme Figura 4.7, através do Google Maps, mostra um tempo médio de 1 hora e 13 minutos para execução de um percurso de 37,1 km, considerando o trânsito livre. Ao se adicionar o tempo de parada acumulado em cada ponto, o tempo total da rota passou para 2 horas e 43 minutos.

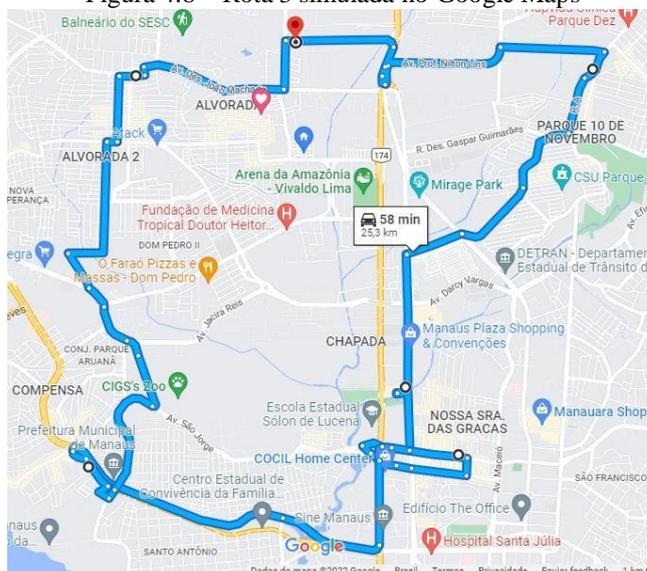
Figura 4.7 – Rota 2 simulada no Google Maps



Fonte: Google Maps (2022)

Uma simulação foi feita, conforme a Figura 4.8, para a Rota 3 por meio do Google Maps, no qual um percurso de 25,3 km foi percorrido em um tempo médio de 58 minutos, considerando o trânsito livre. Ao adicionar o tempo de parada, o tempo total de execução da rota foi de 2 horas e 38 minutos.

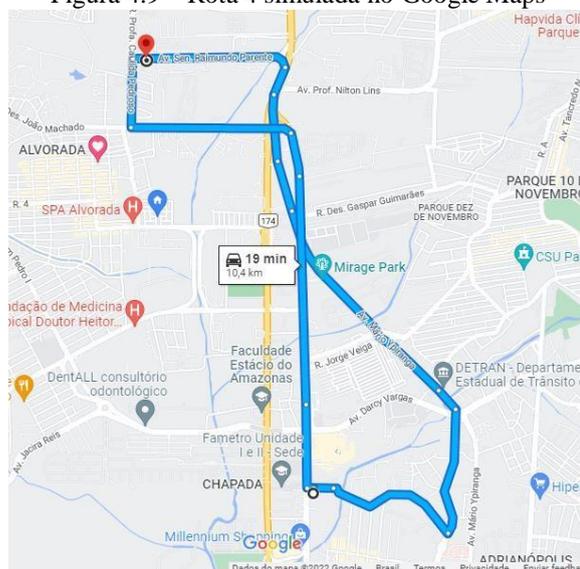
Figura 4.8 – Rota 3 simulada no Google Maps



Fonte: Google Maps (2022)

A Rota 4 foi simulada, utilizando o Google Maps no qual um percurso de 10,4 km foi executado em um tempo médio de 19 minutos, considerando o trânsito livre, conforme representado pela Figura 4.9. O tempo total de execução da rota com a inclusão do tempo de parada foi de 1 hora e 19 minutos.

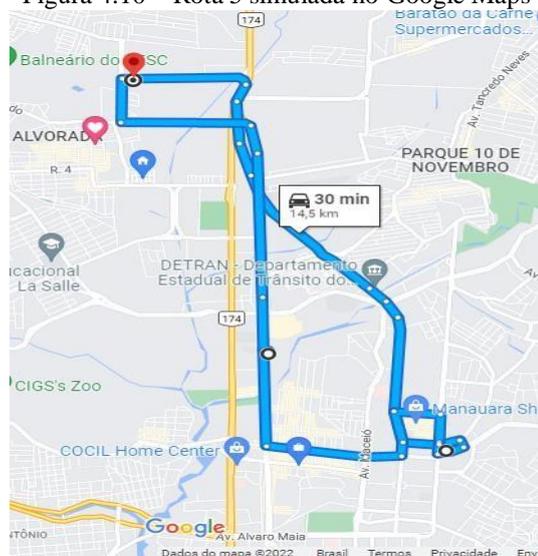
Figura 4.9 – Rota 4 simulada no Google Maps



Fonte: Google Maps (2022)

A Rota 5, conforme ilustrado na Figura 4.10, foi simulada através do Google Maps no qual um percurso de 14,5 km levou um tempo médio de 30 minutos para ser executado, considerando o trânsito livre. Tendo sido acrescentado o tempo de parada, o tempo total de execução foi de 1 hora e 40 minutos.

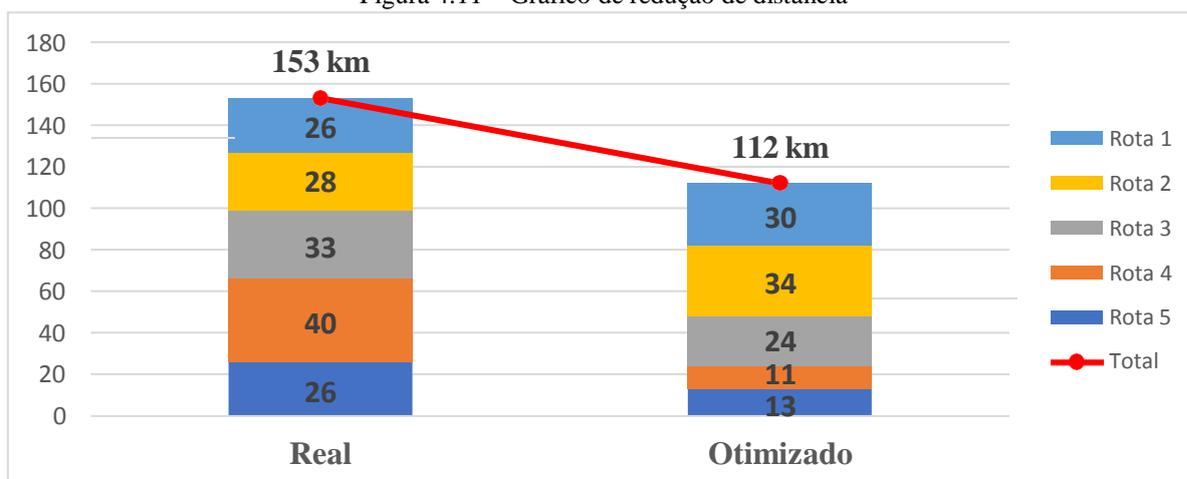
Figura 4.10 – Rota 5 simulada no Google Maps



Fonte: Google Maps (2022)

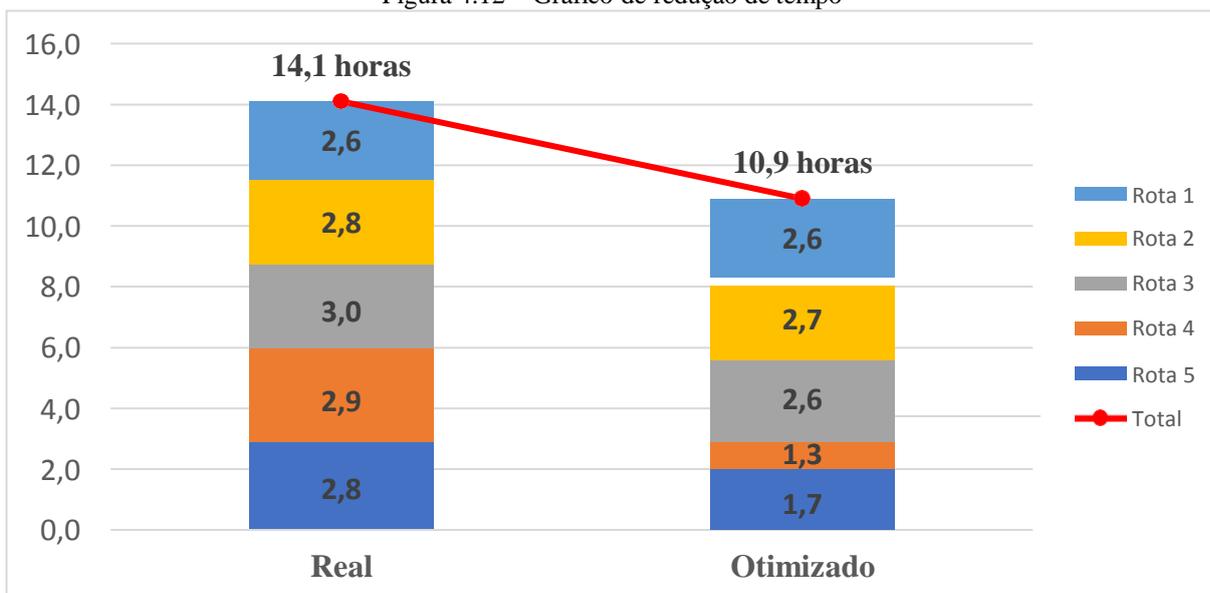
A Figura 4.11 apresenta uma redução 27% na distância total percorrida pelos 5 veículos para atender a 19 pontos de coleta na cidade de Manaus. Esse percentual também reflete na redução de custo variável que é pago por quilometragem já que não é possível, nesse caso, reduzir a quantidade de veículos e nem o custo fixo. No modelo proposto, as rotas 1 e 2 apresentaram aumento da distância ao serem adicionados novos pontos de coleta com vistas a garantir a uma melhor utilização da viatura, refletindo nas demais rotas que demonstram redução significativa do percurso total percorrido pela frota.

Figura 4.11 – Gráfico de redução de distância



Outro resultado relevante é a minimização do tempo (Figura 4.12), decorrente da eliminação de retrabalhos com percursos repetitivos e redução de distâncias, alcançando um índice de 23%, garantindo com isso o tratamento da carga na janela de tempo prevista e, ainda, o cumprimento de prazos, a satisfação dos clientes e a possibilidade de atendimento a novas demandas. Há diferença entre as faixas de tempo referem-se a supressão de trechos nas rotas 2, 3, 4 e 5, contribuindo para um melhor aproveitamento do veículo, apenas a rota 1 manteve o mesmo tempo.

Figura 4.12 – Gráfico de redução de tempo



Com base nos resultados apresentados, o desempenho do GA foi considerado satisfatório para resolver problemas de otimização complexos, como foi o caso do PRV e PCV adotado nesta pesquisa. A partir dos conceitos estudados na literatura foi possível desenvolver um modelo prático que foi testado com base em dados reais de uma empresa de logística para a entrega e/ou coleta de encomendas, considerando a capacidade limitada da frota de veículos, a redução de distância, tempo e custo de forma otimizada.

CAPÍTULO 5

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A presente dissertação trouxe uma proposta de um modelo de otimização de rotas para coletas e/ou entregas de produtos estabelecidos em contratos entre empresa de *courier* e empresas industriais. Esse objetivo foi alcançado por meio da utilização de algoritmos genéticos que se mostraram eficientes na resolução de problemas complexos como o problema do caixeiro viajante e roteirização de veículos abordados neste estudo.

Primeiramente, foram identificadas lacunas e oportunidades de melhoria no processo de roteirização de veículos, através de uma revisão sistemática da literatura que apontou a necessidade de estudos com caso práticos reais, nos quais as pesquisas apresentaram uma tendência para utilização de métodos heurísticos e metaheurísticos para a resolução de problemas de otimização complexos.

Em seguida, foi estruturado um modelo conceitual para roteirização do processo de distribuição e/ou coleta para clientes corporativos, buscando na literatura as ferramentas mais utilizadas e adequadas para simulação e otimização de rotas, utilizando dados reais e de fácil implementação.

Finalmente, foi desenvolvido um modelo de otimização no software Matlab com base numa pesquisa de campo, no qual o sistema foi modelado de acordo com um processo real de uma empresa que atua no ramo de logística. Os resultados foram simulados por meio do Google Maps e atestaram a capacidade de modelo em entregar uma solução otimizada para os problemas de roteirização, contribuindo para o desenvolvimento da ciência e, mais ainda, quando favorece a aplicação prática no mercado possibilitando que as empresas se mantenham competitivas e sustentáveis, quer seja pela melhoria na qualidade dos processos e/ou pela redução de custos.

Ainda que grandes organizações detenham força de trabalho especializada, o planejamento da atividade de transporte continua desafiando os mais experientes profissionais que precisam dedicar horas ou dias de trabalho elaborando toda a programação, muitas vezes de forma manual. Além disso, a não existência de um tempo hábil para essa atividade se torna

um fator complicador para a realização da roteirização, o que pode resultar em grandes prejuízos financeiros com pagamento de multas e indenizações e, conseqüentemente, perda de credibilidade junto aos clientes por descumprimento de prazos contratuais. Nesse contexto, os métodos computacionais avançados, como o desenvolvido nesse estudo possibilitou alcançar resultados melhores e em um tempo significativamente menor.

Assim, o estudo de campo complementou a revisão sistemática da literatura, resultando numa modelagem mais próxima da realidade e sendo colocado à disposição da empresa para utilização no setor de distribuição.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, espera-se que o modelo de otimização ora desenvolvido possa ser customizado como um produto a ser implementado em empresas do segmento de distribuição. Além disso, foram identificadas algumas lacunas que podem ser exploradas com a continuidade dessa pesquisa, as quais estão descritas a seguir:

- Desenvolver um modelo que considere a frota heterogênea, ou seja, veículos com capacidades diferentes e restrições de circulação em áreas restritas.
- Estudar um modelo híbrido que possa considerar problemas de roteirização com veículos capacitados em conjunto com coleta e entrega simultânea e janela de tempo para priorização de objetos expressos.
- Uma oportunidade de pesquisa observada durante esse trabalho foi a necessidade de desenvolvimento de uma metodologia para ordenação e medição da capacidade do veículo com carga diversas de pesos, tamanhos e formas variadas.
- Uma importante complementação seria implementar um modelo com demanda dinâmica e rotas para múltiplos CD's sem que o veículo tenha a obrigatoriedade de retornar ao local de origem, semelhante ao que ocorre com o processo de terceirização no qual o veículo inicia a rota num determinado ponto e terminar em outro, pois, o veículo retorna para a garagem da empresa prestadora do serviço ou o veículo fica com o motorista ao final da rota.

REFERÊNCIAS

- ABBATECOLA, L. *et al.* A distributed cluster-based approach for pick-up services. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 16, n. 2, p. 960-971, 2018.
- AFONSO, M. H. F. *et al.* Como construir conhecimento sobre o tema de pesquisa? Aplicação do processo ProKnow-C na busca de literatura sobre avaliação do desenvolvimento sustentável. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 47-62, 2011.
- ALJOHANI, K.; THOMPSON, R. G. An examination of last mile delivery practices of freight carriers servicing business receivers in inner-city areas. **Sustainability**, v. 12, n. 7, p. 2837, 2020.
- APPLEGATE, D. L. *et al.* **The travelling salesman problem: a computational Study**. Princeton: Princeton University Press, 2006.
- ARAÚJO, F.; LIMA, A. A.; LIMA, M. A. C. Otimização de rota e redução dos custos logísticos: estudo de caso em uma empresa de contabilidade. **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n. 1, p. 136-144, 2018.
- ASSAD, A. A. (Ed.). **Vehicle routing: methods and studies**. North Holland – Amsterdam:[s.n.], 1988. p. 7-46.
- BAKER, B. M.; AYECHIEW, M.A. A genetic algorithm for the vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, v. 30, n. 5, p. 787-800, 2003.
- BATISTA, R. L.; UHLMAN, I. R. Problema de Roteamento de Veículo e suas Variantes: Uma revisão sistemática de literatura. **International Journal of Development Research**, v. 12, n. 3, p. 54402-54410, 2022.
- BODIN, L. D. Routing and scheduling of vehicles and crews, the state of the art. **Computers & Operations Research**, v. 10, n. 2, p. 63-211, 1983.
- BODIN, L. D. Twenty years of routing and scheduling. **Operations research**, v. 38, n. 4, p. 571-579, 1990.
- BRANQUINHO, C. L. S. **Crowdsourcing: uma forma de inovação aberta**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2016.
- BRETIN, A.; DESAULNIERS, G.; ROUSSEAU, L. The traveling salesman problem with time windows in postal services. **Journal of the Operational Research Society**, v. 72, n. 2, p. 383-397, 2021.
- BRUCK, B. P. *et al.* The static bike sharing rebalancing problem with forbidden temporary operations. **Transportation Science**, v. 53, n. 3, p. 882-896, 2019.
- BUTTON, K.; DOYLE, E.; STOUGH, R. Intelligent transport systems in commercial fleet management: a study of short term economic benefits. **Transportation Planning and Technology**, v. 24, n. 2, p. 155-170, 2001.
- CAMPELO JÚNIOR, J. U. **Proposta de Otimização da Roteirização dos Distritos dos Carteiros: um Estudo de Caso no Centro de Entrega de Encomendas de Fortaleza**.

Dissertação (Mestrado em Logística e Pesquisa Operacional) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 99, 2010.

CASTILLO, V. E. **An Inquiry into Supply Chain Strategy Implications of the Sharing Economy for Last Mile Logistics**. PhD diss., University of Tennessee, 2018. https://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/49172018.

CESELLI, A.; RIGHINI, G.; SALANI, M. A column generation algorithm for a rich vehicle-routing problem. **Transportation Science**, v. 43, n. 1, p. 56-69, 2009.

CHEN, D. *et al.* Vehicle routing problem of contactless joint distribution service during COVID-19 pandemic. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, v. 8, p. 100233, 2020.

CHEN, Yueyue *et al.* PPTaxi: Non-Stop Package Delivery via Multi-Hop Ridesharing. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 19, n. 11, p. 2684-2698, 2019.

CHEN, Yujie *et al.* Can sophisticated dispatching strategy acquired by reinforcement learning?- a case study. **In: Dynamic Courier Dispatching System**. arXiv preprint arXiv:1903.02716, 2019.

CONTE, Nelson. **O problema do caixeiro viajante, teoria e aplicações**. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 99, 2002.

COSTA, P. R. O. *et al.* A genetic algorithm for a green vehicle routing problem. **Electronic Notes in Discrete Mathematics**, v. 64, p. 65-74, 2018.

DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The truck dispatching problem. **Management science**, v. 6, n. 1, p. 80-91, 1959.

DARWIN, C. **On the origin of species by means of natural selection, or, the preservation of favoured races in the struggle for life**. Londres, Reino Unido: [s.n.], 1859.

DOUAILOU, K. *et al.* The interaction between industry 4.0 and smart logistics: concepts and perspectives. **In: 2018 international colloquium on logistics and supply chain management (LOGISTIQUA)**. IEEE, 2018. p. 128-132.

DRAGOMIR, A. G.; DOERNER, K. F. Solution techniques for the inter-modal pickup and delivery problem in two regions. **Computers & Operations Research**, v. 113, p. 104808, 2020.

DUPLJANIN, D. *et al.* Urban Crowdsourced Last Mile Delivery: mode of transport effects on fleet performance. **International Journal of Simulation Modelling**, v. 18, n. 3, p. 441-452, 2019.

FIGUEIRA, G.; ALMADA-LOBO, B. Hybrid simulation–optimization methods: A taxonomy and discussion. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 46, p. 118-134, 2014.

GANESH, K.; NALLATHAMBI, A. S.; NARENDRAN, T. T. Variants, solution approaches and applications for vehicle routing problems in supply chain: agile framework and comprehensive review. **International Journal of Agile Systems and Management**, v. 2, n. 1, p. 50-75, 2007.

- GIOVANNI, L.; GASTALDON, N.; SOTTOVIA, F. A two-level local search heuristic for pickup and delivery problems in express freight trucking. **Networks**, v. 74, n. 4, p. 333-350, 2019.
- GDOWSKA, K.; VIANA, A.; PEDROSO, J. P. Stochastic last-mile delivery with crowdshipping. **Transportation Research Procedia**, v. 30, p. 90-100, 2018.
- GOETSCHALCKX, M. Supply chain engineering. **Springer Science & Business Media**, 2011.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, v. 2005.
- GRIGORYEV, I. AnyLogic 7 in three days. A quick course in simulation modeling, v. 2, 2015.
- GUERRAZZI, E. Last mile logistics in smart cities: An IT platform for vehicle sharing and routing. In: **Exploring Digital Ecosystems**. Springer, Cham, 2020. p. 251-260.
- GUPTA, J.; LAL, Sangeeta. Comparison of some approximate algorithms proposed for traveling salesmen and graph partitioning problems. In: Proceedings of 3rd International Conference on Internet of Things and Connected Technologies (ICIOTCT). 2018. p. 26-27.
- HILL, A. V.; MABERT, V. A.; MONTGOMERY, D. W. A decision support system for the courier vehicle scheduling problem. **Omega**, v. 16, n. 4, p. 333-345, 1988.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Cambridge, MA, USA: John Murray, 1975.
- HOSODA, J.; IROHARA, T. Location routing problem with delivery modes. **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 36, n. 3, p. 370-384, 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Noções básicas de cartografia**. Departamento de Cartografia. Rio de Janeiro: IBGE, 1999.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sistema de Referência**. 2011. Disponível em:<ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/sisref_2.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2013.
- INSTRUÇÃO NORMATIVA RFB Nº 1737, DE 15 DE SETEMBRO DE 2017. **Dispõe sobre o tratamento tributário e os procedimentos de controle aduaneiro aplicáveis as remessas internacionais e a habilitação de empresa de transporte internacional expresso porta a porta (empresa de courier)**. Disponível em:<<http://normas.receita.fazenda.gov.br/sijut2consulta/link.action?visao=anotado&idAto=86226>>. Acesso em: 04 mar. 2022.
- IRNICH, S. Solution of real-world postman problems. **European journal of operational research**, v. 190, n. 1, p. 52-67, 2008.
- JANSSENS, J. *et al.* Multi-objective microzone-based vehicle routing for courier companies: From tactical to operational planning. **European Journal of Operational Research**, v. 242, n. 1, p. 222-231, 2015.

- JUNG, H.; LEE, K.; CHUN, W. Integration of GIS, GPS, and optimization technologies for the effective control of parcel delivery service. **Computers & Industrial Engineering**, v. 51, n. 1, p. 154-162, 2006.
- KARCZ, J.; SLUSARCZYK, B. Improvements in the quality of courier delivery. **International Journal for Quality Research**, v. 10, n. 2, p. 355, 2016.
- KRITYAKIERNE, T.; LAESANKLANG, W. Heuristic Route Adjustment for Balanced Working Time. **In: Urban Logistics with Driver Experience and Time-Dependent Traffic Information. Applied Sciences**, v. 10, n. 20, p. 7156, 2020.
- KUKARTSEV, V. V. *et al.* The software application for cargo transportation routes optimization. **In: Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2020. p. 012051.
- LAGANÀ, D.; LAPORTE, G.; VOCATURO, F. A dynamic multi-period general routing problem arising in postal service and parcel delivery systems. **Computers & Operations Research**, v. 129, p. 105195, 2021.
- LAPORTE, G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. **European journal of operational research**, v. 59, n. 3, p. 345-358, 1992.
- LEE, K.; CHAE, J.; KIM, J. A courier service with electric bicycles. **In: an Urban Area: The case in Seoul. Sustainability**, v. 11, n. 5, p. 1255, 2019.
- LEE, K. *et al.* A model for sustainable courier services: Vehicle routing with exclusive lanes. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 1077, 2020.
- LIN, C. K. Y. A vehicle routing problem with pickup and delivery time windows, and coordination of transportable resources. **Computers & Operations Research**, v. 38, n. 11, p. 1596-1609, 2011.
- LIN, E. TJ; LAN, L. W.; HSU, C. ST. Assessing the on- road route efficiency for an air-express courier. **Journal of Advanced Transportation**, v. 44, n. 4, p. 256-266, 2010.
- LIN, X.; NISHIKI, Y.; TAVASSZY, L. A. Performance and intrusiveness of crowdshipping systems: An experiment with commuting cyclists in The Netherlands. **Sustainability**, v. 12, n. 17, p. 7208, 2020.
- LIPOWEZKY, U.; KORENFELD, B.; IDESES, I. Solving the Capacitated Open Vehicle Routing Problem Algorithm, Based on Probability Distribution Modelling of Saving Matrix. **In: 2018 IEEE International Conference on the Science of Electrical Engineering in Israel (ICSEE)**. IEEE, 2018. p. 1-5.
- LIU, M. *et al.* Stochastic drone fleet deployment and planning problem considering multiple-type delivery service. **Sustainability**, v. 11, n. 14, p. 3871, 2019.
- MARTINEZ-SYKORA, Antonio *et al.* Optimized solutions to the last-mile delivery problem in London using a combination of walking and driving. **Annals of Operations Research**, v. 295, n. 2, p. 645-693, 2020.
- MCLEOD, F. N. *et al.* Quantifying environmental and financial benefits of using porters and cycle couriers for last-mile parcel delivery. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 82, p. 102311, 2020.

- MELO, R. S. et al. Inserção de restrições de sincronização no roteamento de veículos – Aplicação a um problema no setor florestal. **In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Anais do XLVIII SBPO**, p. 623-633, 2016.
- METTERS, R. D. Interdependent transportation and production activity at the United States postal service. **Journal of the Operational Research Society**, v. 47, n. 1, p. 27-37, 1996.
- MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + data structures = evolution programs**. 3 ed. Berlin: Springer, 1996.
- CAUCHICK MIGUEL, P. A. *et al.* Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- MALAQUIAS, N. G. L. **Uso dos algoritmos genéticos para a otimização de rotas de distribuição**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, p. 113, 2006.
- MIRHEDAYATIAN, S. M. *et al.* A two-echelon location-routing problem with synchronisation. **Journal of the Operational Research Society**, v. 72, n. 1, p. 145-160, 2021.
- MOHD, A. *et al.* Development of android-based apps for courier service management. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, v. 15, n. 2, p. 1027-1036, 2019.
- MORERI, K. K.; MAPHALE, L.; NKHWANANA, N. Optimizing dispatch and home delivery services utilizing GIS in Botswana: Botswana Post case study. **Spatial Information Research**, v. 25, n. 4, p. 565-573, 2017.
- MUSLU, M. T.; DOGAN, Y. Improved Genetic Algorithm and Mobile Application for an Up-to-date Traveling Salesman Problem. **In: 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)**. IEEE, 2020. p. 1-7.
- NIELS, T.; HOF, M. T.; BOGENBERGER, K. Design and operation of an urban electric courier cargo bike system. **In: 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)**. IEEE, 2018. p. 2531-2537.
- PENG, K. *et al.* A hybrid genetic algorithm on routing and scheduling for vehicle-assisted multi-drone parcel delivery. **IEEE Access**, v. 7, p. 49191-49200, 2019.
- PINCAI, J. *et al.* Forecasting Travel Times with Space Partitioning Methods. **In: GISTAM. 2020a**. p. 151-159.
- PINCAI, J. *et al.* Partitioning space to identify en-route movement patterns. **In: 2020 Seventh International Conference on eDemocracy & eGovernment (ICEDEG)**. IEEE, 2020b. p. 43-49.
- PONTES, D. I. S. *et al.* Modelo crowdshipping de distribuição da última milha: um estudo sobre a operacionalização. **In: 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, 2020.
- PURNAMASARI, C. D.; SANTOSO, A. Vehicle Routing Problem (VRP) for courier service: A review. **In: MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, 2018. p. 07007.

- RESTREPO, M. I.; SEMET, F.; POCREAU, T. Integrated shift scheduling and load assignment optimization for attended home delivery. **Transportation Science**, v. 53, n. 4, p. 1150-1174, 2019.
- ROSANTI, A. A. *et al.* Implementation of saving matrix to determine distribution route of Kalog Express Surakarta. **In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2019. p. 012025.
- ROWLEY, J.; SLACK, Frances. Conducting a literature review. **Management Research News**, 2004.
- SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing: models and methods for image processing**. 3 ed. Amsterdam: Elsevier, 2007. 560 p.
- SEAKHOA-KING, S. *et al.* Revenue-driven scheduling in drone delivery networks with time-sensitive service level agreements. **In: Proceedings of the 12th EAI international conference on performance evaluation methodologies and tools**. 2019. p. 183-186.
- SHARMA, P.; KHURANA, N. Study of optimal path finding techniques. *International Journal of Advancements in Technology*, v. 4, n. 2, p. 124-130, 2013.
- SILVA JÚNIOR, J. C. O. **Metodologia híbrida baseada em sistemas imunes artificiais aplicada na solução de um prve real**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 129, 2017.
- SITEK *et al.* Optimization of capacitated vehicle routing problem with alternative delivery, pick-up and time windows: A modified hybrid approach. **Neurocomputing**, v. 423, p. 670-678, 2021.
- SITEK, P.; WIKAREK, J. Capacitated vehicle routing problem with pick-up and alternative delivery (CVRPPAD): model and implementation using hybrid approach. **Annals of Operations Research**, v. 273, n. 1, p. 257-277, 2019.
- STEEVER, Z.; KARWAN, M.; MURRAY, C. Dynamic courier routing for a food delivery service. **Computers & Operations Research**, v. 107, p. 173-188, 2019.
- STRAKA, M. *et al.* Improvement of logistics in manufacturing system by the use of simulation modelling: A real industrial case study. **Advances in Production Engineering & Management**, v. 15, n. 1, p. 18-30, 2020.
- SYAUQI, M. H.; ZAGLOEL, T. Y. M. Optimization of heterogeneous vehicle routing problem using genetic algorithm in courier service. **In: Proceedings of the 3rd Asia Pacific Conference on Research in Industrial and Systems Engineering 2020**. 2020. p. 48-52.
- TAHA, H A. *Pesquisa operacional*. Pearson Educación, 2008.
- TEBALDI, L.; MURINO, T.; BOTTANI, E. An Adapted Version of the Water Wave Optimization Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows with Application to a Real Case Using Probe Data. **Sustainability**, v. 12, n. 9, p. 3666, 2020.
- TOTH, P.; VIGO, D. **An overview of vehicle routing problems**. In: P. Toth e D. Vigo (Eds). *The vehicle routing problem* (pp. 1- 26). Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.

- TU, W. *et al.* OCD: Online crowdsourced delivery for on-demand food. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 7, n. 8, p. 6842-6854, 2019.
- TURSKÁ, S. *et al.* Optimization of the delivery process in the urban area. In: 23rd International Conference. **Transport Means**. 2019. p. 809-813.
- UHLMANN, I. R; FRAZZON, E. M. Production rescheduling review: Opportunities for industrial integration and practical applications. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 49, p. 186-193, 2018.
- URQUHART, N.; HÖHL, S.; HART, E. An illumination algorithm approach to solving the micro-depot routing problem. In: **Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference**. 2019. p. 1347-1355.
- VAN LOPIK, K. *et al.* Comparison of in-sight and handheld navigation devices toward supporting industry 4.0 supply chains: First and last mile deliveries at the human level. **Applied Ergonomics**, v. 82, p. 102928, 2020.
- WANG, W.; TAO, H.; JIANG, Y. Efficient Delivery Services Sharing with Time Windows. **Applied Sciences**, v. 10, n. 21, p. 7431, 2020.
- WANG, Y.; THOMPSON, R. G.; BISHOP, I. A GIS based information integration framework for dynamic vehicle routing and scheduling. In: **Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference (IVEC'99)** (Cat. No. 99EX257). IEEE, 1999. p. 474-479.
- WASNER, M.; ZÄPFEL, G. An integrated multi-depot hub-location vehicle routing model for network planning of parcel service. **International journal of production economics**, v. 90, n. 3, p. 403-419, 2004.
- WOICESHYN, K. *et al.* Vehicle routing for resource management in time-phased deployment of sensor networks. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 16, n. 2, p. 716-728, 2018.
- XU, Jiuping; YAN, Fang; LI, Steven. Vehicle routing optimization with soft time windows in a fuzzy random environment. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 47, n. 6, p. 1075-1091, 2011.
- YILDIZ, B.; SAVELSBERGH, M. Provably high-quality solutions for the meal delivery routing problem. **Transportation Science**, v. 53, n. 5, p. 1372-1388, 2019.
- YILDIZ, B. Express package routing problem with occasional couriers. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 123, p. 102994, 2021a.
- YILDIZ, B. Package routing problem with registered couriers and stochastic demand. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 147, p. 102248, 2021b.
- ZENG, Y.; TONG, Y.; CHEN, L. Last-mile delivery made practical: An efficient route planning framework with theoretical guarantees. **Proceedings of the VLDB Endowment**, v. 13, n. 3, p. 320-333, 2019.

ZHANG, L.; THOMPSON, R. G. Understanding the benefits and limitations of occupancy information systems for couriers. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 105, p. 520-535, 2019.

ZHANG, S. *et al.* Effective and efficient: Large-scale dynamic city express. **IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering**, v. 28, n. 12, p. 3203-3217, 2016.

ZHAO, L. *et al.* Path optimization model for intra-city express delivery in combination with subway system and ground transportation. **Sustainability**, v. 11, n. 3, p. 758, 2019.

ZHAO, Q.; ZHOU, C.; PEDRIELLI, G. A Decision Support System for Data-Driven Driver-Experience Augmented Vehicle Routing Problem. **Asia-Pacific Journal of Operational Research**, v. 37, n. 05, p. 2050018, 2020.

ZHOU, W.; LIN, J. An On-demand same-day delivery service using direct peer-to-peer transshipment strategies. **Networks and Spatial Economics**, v. 19, n. 2, p. 409-443, 2019.

ZHU, Y.; LEE, K. Y.; WANG, Y. Adaptive elitist genetic algorithm with improved neighbor routing initialization for electric vehicle routing problems. **IEEE Access**, v. 9, p. 16661-16671, 2021.

APÊNDICE A

A1. Parâmetros do Algoritmo Genético

Cenário da manhã – finalizado (teste final)

```
nome2 = ['Demand', '.mat']
```

```
Demand = [0; 0.6; 0.9; 1; 1; 7.5; 2.6; 2.7; 0.9; 0.8; 1; 1.1; 1.5; 1.8; 0.8; 1.1; 1.3; 1.5; 1.0; 2.7]
```

```
save(nome2, 'Demand')
```

%% Parâmetros genéticos de inicialização do algoritmo

```
NIND=2000; % tamanho da população
```

```
MAXGEN=2000; % Máxima Álgebra Genética/número máximo de iterações
```

```
GGAP=0.9; % de probabilidade de intervalo de geração
```

```
Pc=0.9; % de probabilidade de cruzamento
```

```
Pm=0.05; % de probabilidade de mutação
```

A2. Recorte do resultado do modelo de otimização

```
Iteration = 1, Min Distance = 147.00 km  
Iteration = 2, Min Distance = 147.00 km  
Iteration = 3, Min Distance = 141.00 km  
Iteration = 4, Min Distance = 141.00 km  
Iteration = 5, Min Distance = 133.00 km  
Iteration = 6, Min Distance = 133.00 km  
Iteration = 7, Min Distance = 133.00 km  
Iteration = 8, Min Distance = 133.00 km  
Iteration = 9, Min Distance = 133.00 km  
Iteration = 10, Min Distance = 128.00 km  
Iteration = 11, Min Distance = 128.00 km  
Iteration = 12, Min Distance = 128.00 km  
Iteration = 13, Min Distance = 128.00 km  
Iteration = 14, Min Distance = 123.00 km  
Iteration = 15, Min Distance = 123.00 km  
Iteration = 16, Min Distance = 123.00 km  
Iteration = 17, Min Distance = 119.00 km  
Iteration = 18, Min Distance = 119.00 km  
Iteration = 19, Min Distance = 118.00 km  
Iteration = 20, Min Distance = 118.00 km  
Iteration = 21, Min Distance = 118.00 km  
Iteration = 22, Min Distance = 118.00 km  
Iteration = 23, Min Distance = 118.00 km  
Iteration = 24, Min Distance = 118.00 km  
Iteration = 25, Min Distance = 116.00 km  
Iteration = 26, Min Distance = 116.00 km  
Iteration = 27, Min Distance = 116.00 km  
Iteration = 28, Min Distance = 116.00 km  
Iteration = 29, Min Distance = 115.00 km  
Iteration = 30, Min Distance = 115.00 km  
Iteration = 31, Min Distance = 115.00 km  
Iteration = 32, Min Distance = 115.00 km  
Iteration = 33, Min Distance = 115.00 km  
Iteration = 34, Min Distance = 115.00 km  
Iteration = 35, Min Distance = 115.00 km  
Iteration = 36, Min Distance = 115.00 km  
Iteration = 37, Min Distance = 115.00 km  
Iteration = 38, Min Distance = 115.00 km
```

Iteration = 1977, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1978, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1979, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1980, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1981, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1982, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1983, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1984, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1985, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1986, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1987, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1988, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1989, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1990, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1991, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1992, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1993, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1994, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1995, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1996, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1997, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1998, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 1999, Min Distance = 112.00 km
Iteration = 2000, Min Distance = 112.00 km

Elapsed time is 267.589783 seconds.

Total Distance = 112 km

Best Route:

0 -> 9 -> 10 -> 2 -> 3 -> 1 -> 0 -> 14 -> 15 -> 16 -> 17 -> 13 -> 0 -> 12 -> 19 -> 18 -> 4 -> 8 -> 0 -> 5 -> 0 -> 11
-> 6 -> 7 -> 0

Route of Vehichle No.1: 0 -> 9 -> 10 -> 2 -> 3 -> 1 -> 0

Distance traveled: 30.00 km, load rate: 57.33%;

Route of Vehichle No.2: 0 -> 14 -> 15 -> 16 -> 17 -> 13 -> 0

Distance traveled: 34.00 km, load rate: 86.67%;

Route of Vehichle No.3: 0 -> 12 -> 19 -> 18 -> 4 -> 8 -> 0

Distance traveled: 24.00 km, load rate: 94.67%;

Route of Vehichle No.4: 0 -> 5 -> 0

Distance traveled: 11.00 km, load rate: 100.00%;

Route of Vehichle No.5: 0 -> 11 -> 6 -> 7 -> 0

Distance traveled: 13.00 km, load rate: 85.33%;

>>