

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DO NORTE DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* PIRAPORA

DOUGLAS CARLOS DA SILVA OLIVEIRA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE ROTEAMENTO DE  
VEÍCULOS COM FROTA HETEROGÊNEA UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO  
POR COLÔNIA DE FORMIGAS**

Pirapora

2018



DOUGLAS CARLOS DA SILVA OLIVEIRA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE ROTEAMENTO DE  
VEÍCULOS COM FROTA HETEROGÊNEA UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO  
POR COLÔNIA DE FORMIGAS**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Bacharelado em Sis-  
temas de Informação do Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de  
Minas Gerais - *Campus* Pirapora como Re-  
quisito Avaliativo da disciplina de TCC II.

Trabalho aprovado. Pirapora, colocar a data.

---

**Prof. Dr. Luciano Soares de Souza**  
Orientador

---

**Prof. Esp. Flavio Augusto Maia**  
**Santiago**  
IFNMG-Pirapora

---

**Prof. Mestre Alessandro Carneiro**  
**Ribeiro**  
IFNMG-Pirapora

Pirapora

2018



DOUGLAS CARLOS DA SILVA OLIVEIRA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE ROTEAMENTO DE  
VEÍCULOS COM FROTA HETEROGÊNEA UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO  
POR COLÔNIA DE FORMIGAS**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais - *Campus* Pirapora como Requisito Avaliativo da disciplina de TCC II.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Soares de Souza

Pirapora

2018



*Agradeço ao mundo por mudar as coisas, por nunca fazê-las serem da mesma forma, pois assim não teríamos o que pesquisar, o que descobrir e o que fazer, pois através disto consegui concluir a minha monografia.*



## **Agradecimentos**

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.



*“Escreva algo que valha a pena ler  
ou faça algo que valha a pena escrever.  
(Benjamin Franklin)*



## RESUMO

Neste trabalho foi aplicado a meta-heurística Colônia de Formigas (ACO) a um problema de Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea (VRPFH). O processo consiste em alocar uma colônia de formigas que tem como papel encontrar a menor rota para percorrer um trajeto. Modificações foram realizadas para permitir a busca de múltiplas rotas e assim encontrar uma solução para realizar entregas de encomendas. A abordagem usada gerou soluções para o problema e se provou uma estratégia adequada.

**Palavras-chave:** Colônia de Formigas. ACO. Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea. VRPFH.



## ABSTRACT

In this work the meta-heuristic Ant Colony Optimization Algorithm (ACO) was applied to a Vehicle Routing Problem with Multiple Vehicle Types (VRPFH). The process consists in allocating a colony of ants whose role is to find the smallest route to travel along a route. Modifications have been made to allow the search of multiple routes and thus find a solution to make parcel deliveries. The approach used has provided solutions to the problem and proven an appropriate strategy.

**Key-words:** Ant Colony Optimization Algorithm. ACO. Vehicle Routing Problem with Multiple Vehicle Types. VRPMVT.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema gráfico de solução de um Problema de Roteamento de Veículos (PRV) . . . . .	30
Figura 2 – Experimento da Ponte Dupla com pontes de mesmo tamanho . . . . .	33
Figura 3 – Fluxograma representando o Algoritmo Colônia de Formigas aplicado ao Problema de Roteamento de Veículos. . . . .	39
Figura 4 – Solução 1 . . . . .	43
Figura 5 – Solução 2 . . . . .	43
Figura 6 – Solução 3 . . . . .	44
Figura 7 – Melhor solução – Rota 1 . . . . .	44
Figura 8 – Melhor solução – Rota 2 . . . . .	45
Figura 9 – Melhor solução – Rota 3 . . . . .	45



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frota de veículos . . . . .	41
Tabela 2 – Localizações e cargas . . . . .	42
Tabela 3 – Soluções encontradas . . . . .	42



## Lista de Algoritmos

1	Algoritmo Colônia de Formigas . . . . .	38
---	---	----



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IFNMG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais
SI	Sistemas de Informação
PRV	Problema de Roteamento de Veículos
PRVFH	Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea
ACO	Ant Colony Optimization Algorithm
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
CDMA	Code Division Multiple Access
GUSEK	GLPK Under Scite Extended
GLPK	GNU Linear Programming Kit
API	Application Programming Interface
PHP	Personal Home Page
ARM	Advanced RISC Machine



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Sigma$	Somatório em Matemática
$\tau$	Letra grega tau
$\alpha$	Letra grega alpha
$\eta$	Letra grega eta
$\beta$	Letra grega beta
$\notin$	Não pertence



## Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	27
1.1	Objetivos . . . . .	28
1.1.1	Objetivo geral . . . . .	28
1.1.2	Objetivos específicos . . . . .	28
2	PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS . . . . .	29
2.1	Logística . . . . .	29
2.1.1	A logística nas entregas . . . . .	29
2.2	Problema do Roteamento De Veículos (PRV) . . . . .	29
2.3	Problema de Roteamento De Veículos com Frota Heterogênea (PRVFH) . . . . .	31
2.4	Complexidade Computacional . . . . .	32
2.4.1	Otimização Combinatória . . . . .	32
2.4.2	Heurísticas . . . . .	32
2.4.2.1	Algoritmo Colônia de Formigas (ACO) . . . . .	33
2.5	Trabalhos relacionados . . . . .	34
2.5.1	Projetos de Roteamento de Veículos . . . . .	34
2.5.2	Projetos de Colônia de Formigas . . . . .	35
3	PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DE ACO PARA RESOLUÇÃO DO PRVFH . . . . .	37
3.1	Geração da solução inicial . . . . .	37
3.2	Algoritmo Proposto . . . . .	37
4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS . . . . .	41
4.1	Dados usados . . . . .	41
4.2	Obtenção das distâncias . . . . .	41
4.3	Configurações de Execução dos Experimentos . . . . .	41
4.4	Discussão dos Resultados . . . . .	42
5	CONCLUSÃO . . . . .	47
5.1	Trabalhos Futuros . . . . .	47
	REFERÊNCIAS . . . . .	49



## 1 INTRODUÇÃO

O processo de logística para distribuição, entrega e coleta nas organizações possui um papel crucial e estratégico em suas atividades. O aprimoramento desse processo é fundamental para a saúde desses negócios, trazendo também maior competitividade no mercado no qual está inserido. A falha no processo de logística pode trazer impacto sobre os lucros dessas empresas (BOWERSOX, 2011).

Um processo eficaz de entrega e/ou coleta passa por um planejamento no qual o melhor trajeto deve ser identificado e que atenda os objetivos do cliente.

A busca e melhoria constante fazem parte da estratégia de competição e crescimento. As organizações buscam cada vez mais diminuir os custos referentes à logística para que possam fazer uma gestão mais eficiente e consciente com bons investimentos. As empresas, de acordo com Bowersox (2011), procuram satisfazer as expectativas básicas do cliente com um custo total realista.

De acordo com Lima *et al.* (2005), esse tipo de problema aparece em um grande número de casos. Pode-se citar como exemplos serviços de entrega ou recolhimento de mercadorias, de coleta de lixo, de transporte de pessoas, entrega postal, entre outros, o que demonstra a importância de estudos dessa natureza do ponto de vista econômico.

O tema no qual será desenvolvido o presente trabalho é o Problema de Roteamento de Veículos (PRV) para entrega de mercadorias, mais especificamente, tendo como problema prático a solução de um Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea (PRVFH) e o desenvolvimento de um *software* capaz de solucioná-lo, fazendo o uso da meta-heurística Colônia de Formigas (ACO, do inglês *Ant Colony Optimization Algorithm*) que é capaz de construir rotas como mostrado por Nogueira e Aguiar (2013).

O PRV foi proposto primeiramente por Dantzig e Ramser (1959), podendo ser considerado como uma generalização para o Problema do Caixeiro Viajante. Consiste em alocar uma frota veicular para o atendimento de uma determinada demanda de consumidores distribuídos geográfica ou espacialmente (OLIVEIRA, 2007).

Para aumentar a eficiência em um deslocamento é necessária a descoberta de novas rotas no intuito de minimizar as distâncias (MASIERO, 2008). Este é um típico problema de otimização combinatória. Nesses casos, além de uma solução possível, é necessária a otimização dos objetivos de interesse (MIYAZAWA; SOUZA, 2015). O ACO, que foi proposto a partir da análise de uma colônia de formigas se deslocando em busca de alimento, fornece informações como a menor distância conhecida e pode ser facilmente utilizado para solucionar o PRV (BELL; MCMULLEN, 2004).

O transporte rodoviário aumenta sua eficiência a partir da descoberta de melhores rotas para os veículos. Conforme MASIERO (2008), o custo logístico está sendo cada vez mais um diferencial competitivo, tanto para companhias que prestam serviços de

deslocamento de cargas como também para as companhias que se utilizam desses serviços a fim de que possam se assegurar no mercado.

A utilização da Pesquisa Operacional como método de tomada de decisão unidos aos conhecimentos acadêmicos voltada para resolução de problemas reais traz um alto valor para esse trabalho e de grande importância na aplicação na área de logística para gerar informações necessárias para tomada de decisão.

Na maior parte das empresas, a atividade de transporte representa um dos itens mais importantes na composição do custo logístico da organização. O modal rodoviário é responsável por 60% do total de cargas movimentadas no Brasil (chegando a 90% no estado de São Paulo), e a frota de caminhões é da ordem de 1.800.000 veículos (TIGERLOG, 2017). Nesta busca, sistemas que permitam maior eficácia no uso dos recursos, com a redução das distâncias percorridas nas rotas, melhorias no nível de atendimento e melhor distribuição dos veículos disponíveis são demandados pelo mercado.

O uso de Sistemas de Roteamento de Veículos traz a redução de consumo de recursos naturais e poluição à medida que obtém uma menor distância percorrida pelos veículos.

Este trabalho pretende desenvolver um software com o uso de uma meta-heurística e obter soluções para o Problema de Roteamento de Veículos.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma ferramenta de *software* capaz de solucionar o Problema de Roteamento de Veículos o qual possa ser usado como uma ferramenta para empresas que em suas atividades façam serviços de entregas de mercadorias.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Abordar o Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea.
- Implementar o algoritmo de otimização Colônia de Formigas para obter soluções viáveis em um tempo computacional razoável no problema do PRV.
- Gerar rotas de entrega com o itinerário dos veículos que farão as entregas das encomendas.
- Gerar automaticamente mapas que possibilitem a visualização das rotas geradas, essenciais para o planejamento de entregas.

## 2 Problema de Roteamento de Veículos

Nesse capítulo será abordado a temática do Problema de Roteamento de Veículos, sua importância, complexidade e os processos de solução.

### 2.1 Logística

É inquestionável a contribuição da logística para o crescimento econômico e social em qualquer lugar do mundo. Para Moura (2006), a logística deve acrescentar valor ou utilidade para o cliente, satisfazendo suas necessidades de produto ou serviço na quantidade e condições contratadas. O produto deve ser entregue ao cliente correto, em tempo, local e custos certos.

Conforme Magee (1985), a logística é “a arte de administrar o fluxo de materiais e produtos, da fonte ao consumidor. O sistema logístico inclui o fluxo total de materiais, desde a aquisição da matéria-prima até à entrega dos produtos acabados aos consumidores finais”

Nos últimos anos, aumentou-se a utilização das tecnologias da informação em muitas áreas da logística, o que facilitou o seu desempenho. Esse incremento de tecnologia propicia o surgimento de novas oportunidades e desafios (MOURA, 2006).

#### 2.1.1 A logística nas entregas

Uma das características da logística é que esta nunca para: sempre há clientes a comprar mercadorias, a todo momento, dos mais variados tipos, em pontos de vendas diversos.

Podemos identificar períodos distintos de quem fornece ou recebe os produtos. Para o cliente, é quando ele vê uma necessidade, faz uma compra, dando origem a uma encomenda, até quando ela é recebida e fica disponível para consumo. Para o fornecedor, corresponde ao período de tempo no qual recebe o pedido e o momento no qual é feita a entrega ao seu cliente, no local estabelecido.

No intervalo entre o pedido e a entrega do produto, é que são tomadas as decisões em relação ao seu transporte, o que exige a ponderação de múltiplos aspectos e que pode demandar muitas etapas. O transporte é um coeficiente a considerar, na medida em que influencia a movimentação de produtos e determina com que velocidade estes chegarão a um determinado local. O cliente final, que irá receber estes produtos, em geral, têm muitas alternativas de meios de transporte e irá optar por aquele que melhor atenda suas necessidades. (MOURA, 2006).

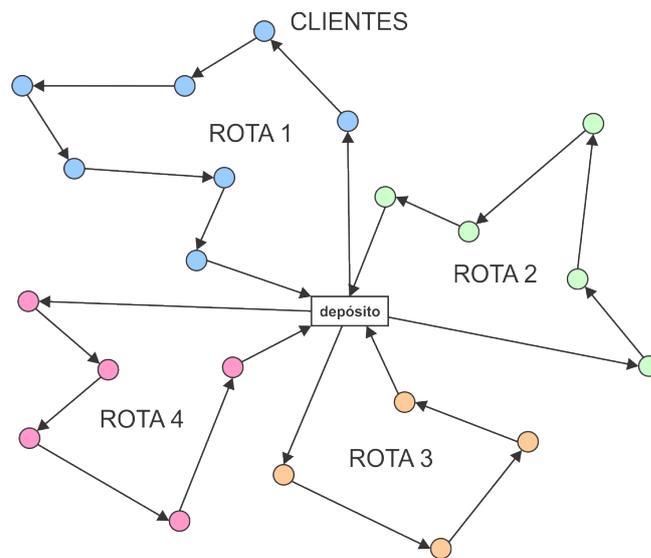
### 2.2 Problema do Roteamento De Veículos (PRV)

Sobre as decisões de transportes envolvendo embarque, rotas e a programação, Ballou (2009) afirma que nelas pesam fatores como proximidade, ou distância, entre o

armazém e o cliente, sendo que essas decisões impactam sobre a lucratividade, o fluxo de caixa e o retorno do investimento.

Pereira (2012) relata que os primeiros problemas com rotas, data de 1800, e foram desenvolvidos por dois matemáticos, William Rowan Hamilton e Thomas Penyngton Kerkman que propuseram o Problema do Caixeiro Viajante (PCV). Consiste na busca de um circuito cuja a rota possua a menor distância possível, começando numa cidade qualquer e visitando cada cidade apenas uma única vez.

Figura 1 – Esquema gráfico de solução de um Problema de Roteamento de Veículos (PRV)



Fonte: Adaptado de Villalobos (2007)

De acordo com Gold e Carić (2008), o problema clássico de Roteamento de Veículo (PRV) visa encontrar um conjunto de rotas a um custo mínimo (encontrando o caminho mais curto, minimizando o número de veículos, etc.) começando e terminando a rota no depósito, de modo que a demanda conhecida de todos os nós seja cumprida. Cada nó é visitado apenas uma vez, por apenas um veículo, e cada veículo tem uma capacidade limitada. Na figura 1 é mostrado um exemplo com várias rotas de entregas.

Assim sendo, o PRV tem como finalidade encontrar as rotas que liguem os pontos com a demanda a ser atendida, diminuindo a distância total percorrida pelos veículos. A fórmula proposta por Dantzig e Ramser (1959) é a seguinte:

1. Dado um, conjunto de  $n$  "pontos de estação"  $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$  para o qual entregas são feitos a partir do ponto " $P_0$ ", chamado de "ponto terminal".
2. Uma "Matriz de Distância"  $[D] = [d_{ij}]$  é dada, que especifica a distância  $d_{ij} = d_{ji}$  entre cada par de pontos  $(i, j = 0, 1, \dots, n)$ .

3. Um "vetor de entrega"  $(Q) = (q_i)$  é dado, o qual especifica a quantidade  $q_i$  para ser entregue a cada ponto  $P_i (i = 1, 2 \dots n)$ .
4. A capacidade do caminhão é  $C$ , onde  $C > \max. q_i$ .
5. Se  $x_{ij} = x_{ji} = 1$  é interpretado como significando que os pontos  $P_i$  e  $P_j$  estão emparelhados  $(i, j = 0, 1 \dots n)$  e se  $x_{ij} = x_{ji} = 0$  significa que os pontos não estão emparelhados, obtém-se a condição

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

já que todo ponto  $P_i$  está conectado com  $P_0$  ou no máximo um outro ponto  $P_j$ . Além disso, por definição,  $x_{ii} = 0$  para cada  $i = 0, 1, \dots n$ .

6. O problema é encontrar os valores de  $x_{ij}$  que tornam a distância total mínima

$$\sum_{i,j=0}^n d_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

nas condições especificadas em 2 a 5.

Por causa de sua complexidade, é exigido um esforço computacional muito grande para resolver o problema de roteamento:

PRV é um problema NP-difícil de otimização combinatória que pode ser resolvido exatamente para pequenas instâncias do problema. Embora a abordagem heurística não garanta um ótimo resultado, produz melhores resultados na prática. Nos últimos vinte anos, as meta-heurísticas têm emergido como a direção mais promissora da pesquisa para a família de problemas da PRV (GOLD; CARIC, 2008, p. 5).

### 2.3 Problema de Roteamento De Veículos com Frota Heterogênea (PRVFH)

O problema do PRVFH (Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea) possui as mesmas características do PRV, a diferença é que no segundo sistema os veículos possuem características diferentes e se pode obter quantidades ilimitadas de cada tipo. Neste caso, a finalidade é encontrar a melhor frota e otimizar as rotas.

Empresas de transporte, na maioria das vezes, podem ter uma frota mista de veículos ou estar adquirindo uma nova frota, sendo esses com diferentes capacidades.

O PRVFH, de acordo com Baldacci, Battarra e Vigo (2008) tem as seguintes características específicas:

- (i) cada cliente é visitado uma única vez em uma única rota; e
- (ii) o número de rotas não deve ser maior que a quantidade de veículos disponíveis.

Este trabalho tem como objetivo obter soluções para o Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea.

## 2.4 Complexidade Computacional

Achar uma solução ótima para o PRV não é uma tarefa simples, pois é preciso uma enorme quantidade de operações para sua resolução. Resolver o PRV exige solucionar duas questões: o problema de roteamento de veículos e o problema de atribuição de rotas, que possuem elevada complexidade computacional Garey e Johnson (1979).

A seguir serão explicados os métodos Otimização Combinatória que solucionam problemas de otimização com a exploração contínua dentro de um espaço de busca e Heurísticas que ignoram parte da informação com o objetivo de tornar a escolha mais fácil e rápida.

### 2.4.1 Otimização Combinatória

A otimização combinatória é um ramo da ciência que estuda problemas de otimização com objetivo de buscar soluções que proporcionem melhor uso dos recursos. No geral, os objetivos característicos dos problemas de otimização combinatória compõem-se em usufruir melhor os materiais no processo de produção, otimizar o tempo a realização de ações e operações, transportar mais materiais pelas melhores rotas, diminuir chances de se obter prejuízos, aumentar lucros e diminuir gastos (MIYAZAWA; SOUZA, 2015).

O foco da otimização combinatória é encontrar o objeto "ótimo" (ou seja, um objeto que maximiza ou minimiza uma função específica) de um conjunto finito de objetos matemáticos. Normalmente, é impraticável aplicar uma pesquisa exaustiva à medida que o número de soluções possíveis cresce rapidamente com o "tamanho" da entrada do problema.

Desta maneira, surge a necessidade de usar técnicas mais elaboradas para encontrar soluções de valor ótimo, que pode ser de valor mínimo, caso o problema seja de minimização, ou máximo, caso o problema seja de maximização (MIYAZAWA; SOUZA, 2015, p. 14).

Vários problemas de otimização combinatória podem ser resolvidos por algoritmos rápidos e exatos, exceto os de grande porte, que exigem grande processamento computacional.

### 2.4.2 Heurísticas

Em diversos problemas não é possível encontrar uma solução ótima, mas é necessário encontrar uma solução razoável.

Um método heurístico é uma solução capaz de encontrar uma solução viável, mas abrindo mão do melhor resultado. Um método heurístico é usado por ser capaz de terminar

em um tempo computacional razoável trazendo o melhor resultado encontrado. As meta-heurísticas são métodos heurísticos adequados para o tipo de problema específico.

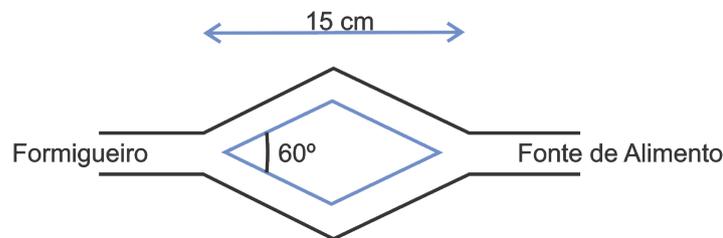
Os métodos heurísticos em geral se baseiam em ideias relativamente simples de senso comum de como procurar uma boa solução. Essas ideias precisam ser cuidadosamente adaptadas para se adequar ao problema de interesse específico (HILLIER; LIEBERMAN, 2013, p. 581).

Métodos heurísticos podem ser encontrados em reconhecimento de idioma, análise de *Big Data*, aprendizado de máquina e inteligência artificial como por exemplo prever jogadas em um jogo de xadrez que tem demasiados movimentos possíveis.

#### 2.4.2.1 Algoritmo Colônia de Formigas (ACO)

ACO tem como fundamento o comportamento de uma colônia de formigas na natureza, elas encontram rotas mais eficientes para fontes de comidas a partir do seu ninho. As formigas são extremamente simples e têm uma capacidade limitada de processar e trocar informações. No entanto, é muito importante que elas encontrem o menor caminho para uma fonte de alimento, diminuindo com isso o trabalho e os perigos aos quais estão expostas. É necessário, também que as formigas entre em um consenso sobre qual caminho seguir.

Figura 2 – Experimento da Ponte Dupla com pontes de mesmo tamanho



Fonte: Manfrin *et al.* (2006)

Ao sair em busca de alimentos, as formigas tendem a depositar uma certa quantidade de feromônio pelo caminho. As outras formigas conseguem percebê-lo e tendem a seguir esse feromônio, aumentando as chances de estas percorrerem o caminho correto.

Esse comportamento foi estudado por Deneubourg *et al.* (1990) através do experimento da ponte dupla. No experimento, feito com uma colônia de formigas argentinas, duas pontes de mesmo tamanho foram posicionadas entre o formigueiro e a fonte de alimento, conforme demonstrado na Figura 2.

A princípio, cada formiga escolhe um caminho diferente. Após um tempo, devido a fatores aleatórios, uma das pontes é selecionada pelas formigas por conter maior concentração de feromônio, o que atrai outras formigas e, portanto, mais feromônio é depositado na trajetória. Na sequência, um único caminho é utilizado por elas.

No algoritmo Colônia de Formigas, em cada iteração do algoritmo, cada formiga se move de  $i$  para  $j$ , correspondente a uma solução intermediária mais completa. Assim cada formiga  $K$  calcula um conjunto  $A_{k(i)}$  de expansões viáveis ao seu estado atual em cada iteração, e se move para uma das possibilidades. Leva-se em consideração na hora da formiga se movimentar a atratividade  $p_{ij}$  do caminho e o nível da trilha  $\tau_{ij}$ .

$$\tau_{ij} = (1 - \alpha)\tau_{ij} + \alpha(L)^{-1} \quad (3)$$

O nível da trilha representa a conveniência dos movimentos, atualizado geralmente quando todas as formigas completam sua solução, fórmula 3, aumentando ou diminuindo o nível das trilhas.  $\tau_{ij}$  representa a quantidade de feromônio no caminho da localização atual  $i$  e o local  $j$ .

$$p_{ij}^k = \frac{(\tau_{ij})(\eta_{ij})^\beta}{\sum_{u \notin M_k} (\tau_{iu})(\eta_{iu})^\beta} \quad (4)$$

Em geral  $k$  é a formiga que se move de  $i$  para  $j$ , representada pela equação 4.  $p_{ij}^k$  representa a probabilidade da formiga selecionar uma rota. Quando todas as formigas completarem a solução, as trilhas são atualizadas, o laço é repetido até que se satisfaça a variável de parada, e a melhor rota é escolhida pelo sistema, na prática é escolhida a que aparece mais vezes.

Um grupo de formigas virtuais são usadas para gerar soluções para o PRV, o processo de tomada de decisão está incorporada em seu algoritmo. Esta abordagem é importante porque oferece soluções para um problema recorrente em ciência do transporte.

Para os problemas complexos é razoável o uso de uma heurística para encontrar soluções, a otimização por Colônia de Formigas (ACO) para o Problema De Roteamento De Veículo (PRV) é adequado para encontrar rotas.

## 2.5 Trabalhos relacionados

Foram analisados diversas iniciativas e os trabalhos foram divididos em duas sub-seções: (2.5.1) trabalhos Roteamento de Veículos; (2.5.2) trabalhos envolvendo Colônia de Formigas.

### 2.5.1 Projetos de Roteamento de Veículos

Em Malaquias *et al.* (2006) é apresentada o uso da metaheurística Algoritmos Genéticos para analisar a cadeia de abastecimento do setor farmacêutico. Para se encontrar resultados competitivos, essa técnica foi hibridizada com um método de busca local aplicada a cada geração de determinados indivíduos, gerando soluções de melhor qualidade se comparadas às soluções geradas pelos métodos heurístico convencionais.

Santos (2014) utilizou-se de dados presentes em instância disponível na literatura para a criação de um cenário hipotético e implementou em uma interface de resolução de problemas de Programação Linear denominada GUSEK para que a capacidade dos veículos disponíveis não seja excedida e que o somatório das distâncias percorridas por todos os veículos seja o menor possível na logística de distribuição.

### 2.5.2 Projetos de Colônia de Formigas

Filho (2012) fez o uso da técnica Otimização por Colônia de Formigas, de forma a aplicá-la aos sistemas de telecomunicações sem fio com o auxílio da plataforma MatLab para solucionar problemas de controle de potência, taxa e eficiência energética e espectral de sistemas CDMA.

Neto e Filho (2013) obteve uma diminuição de custos com terceirização de mão de obra e tempo de tarefa em uma máquina que tem como função executar várias tarefas. Ele usou a abordagem da inteligência coletiva do ACO para diminuir o tempo total para liberação das tarefas executadas e sua viabilidade além de identificar as que devem ser terceirizadas.

Aloise *et al.* (2002) usou a Heurística De Colônia De Formigas com Path- Relinking para otimização do itinerário das sondas de Produção Terrestre – SPT, com o objetivo de obter a melhor alocação de atendimento, de maneira a maximizar o retorno de óleo produzido num certo intervalo de tempo.



### 3 Proposta de Utilização de ACO para Resolução do PRVFH

Aqui são apresentados os processos do algoritmo proposto, etapa para geração da solução inicial e a busca da melhor rota usando a meta-heurística Colônia De Formigas.

#### 3.1 Geração da solução inicial

Para a geração inicial foi usado o método do Vizinho Mais Próximo, essa geração faz se necessária para conhecer a distância total das entregas, essa distância será usada na sequência, no Algoritmo para encontrar a melhor rota.

O método Vizinho Mais Próximo foi usado para determinar uma solução para o Problema do Caixeiro-Viajante, no qual o vendedor inicia sua trajetória em uma cidade qualquer e visita as cidades mais próximas até que todas tenham sido visitadas. Com esse método é possível gerar uma rota, mas geralmente não é a melhor opção devido à sua natureza “gananciosa” (GUTIN; YEO; ZVEROVICH, 2002).

No algoritmo Vizinho Mais Próximo a partir de uma vértice é construído um tour repetindo a escolha pelo arco mais barato até que todos os arcos estejam escolhidos naquele tour (GUTIN; YEO; ZVEROVICH, 2002).

Para gerar as rotas os veículos são ordenados por capacidade decrescente. Ao atingir sua capacidade o veículo deve retornar ao depósito e cada cliente deve ser atendido por apenas um veículo.

#### 3.2 Algoritmo Proposto

Usando o ACO, podemos comparar o veículo a uma formiga que deve sair do depósito e retornar para este quando ele estiver vazio. O algoritmo usado aqui foi proposto por (BELL; MCMULLEN, 2004) para a busca das múltiplas rotas do PRV. A formiga deve selecionar um cliente a partir da capacidade do veículo e a lista de locais viáveis. A formiga deve selecionar um cliente até que a capacidade do veículo se esgote ou quando não houver mais clientes a ser visitados. Um tour é formado quando uma formiga forma uma rota completa, necessária antes de outra formiga sair. A distância total  $L$  é calculada como o valor da função objetiva para a rota completa.

Ao passar pelas rotas as formigas deixam um feromônio, que inicialmente vai ser preenchido nos arcos escolhidos pela rota inicial. O feromônio é representado nas fórmulas por  $\tau$ .

Para construir uma rota, a formiga deve selecionar o próximo cliente  $j$  usando a seguinte fórmula probabilística:

$$j = \arg \max \{ (\tau_{iu}) (\eta_{iu})^\beta \} \text{ for } u \notin M_k, \quad \text{if } q \leq q_0 \quad (5)$$

onde  $\tau_{iu}$  representa a quantidade de feromônio no caminho entre a localização atual  $i$  e os possíveis locais  $u$ .  $\eta_{iu}$  é o inverso da distância entre as duas localizações do cliente e o parâmetro  $\beta$  estabelece a importância da distância em comparação com a quantidade de feromônios no algoritmo de seleção. Os locais já visitados são armazenados na variável  $M_k$  e não são considerados para a seleção. O Valor  $q$  é uma variável aleatória  $[0,1]$  e o valor  $q_0$  é um parâmetro. Quando a decisão de seleção é feita, a formiga seleciona o arco com maior valor da Equação 5, a menos que  $q$  seja maior que  $q_0$ . Neste caso, a formiga seleciona uma variável aleatória para ser o próximo cliente a visitar com base na distribuição de probabilidade de  $p_{ij}$ , que favorece caminhos curtos com altos níveis de feromônio:

$$p_{ij}^k = \frac{(\tau_{ij})(\eta_{ij})^\beta}{\sum_{u \notin M_k} (\tau_{iu})(\eta_{iu})^\beta} \quad \text{if } j \notin M_k \quad (6)$$

Com o uso das fórmulas 5 e 6 é possível escolher o caminho mais favorável ou selecionar o caminho aleatoriamente usando o operador genético Método da Roleta ( *Roulette wheel selection*) com base em uma distribuição de probabilidade estabelecida pela distância e pelo feromônio. Após um determinado número de formigas  $m$  construir uma rota viável, é feita a atualização global da trilha pela adição de feromônio usando a formula 3 em todos os arcos da melhor rota.

O Algoritmo Colônia de Formigas 1 foi usado para encontrar as soluções, ele é demonstrado a seguir:

---

**Algoritmo 1:** Algoritmo Colônia de Formigas

---

```

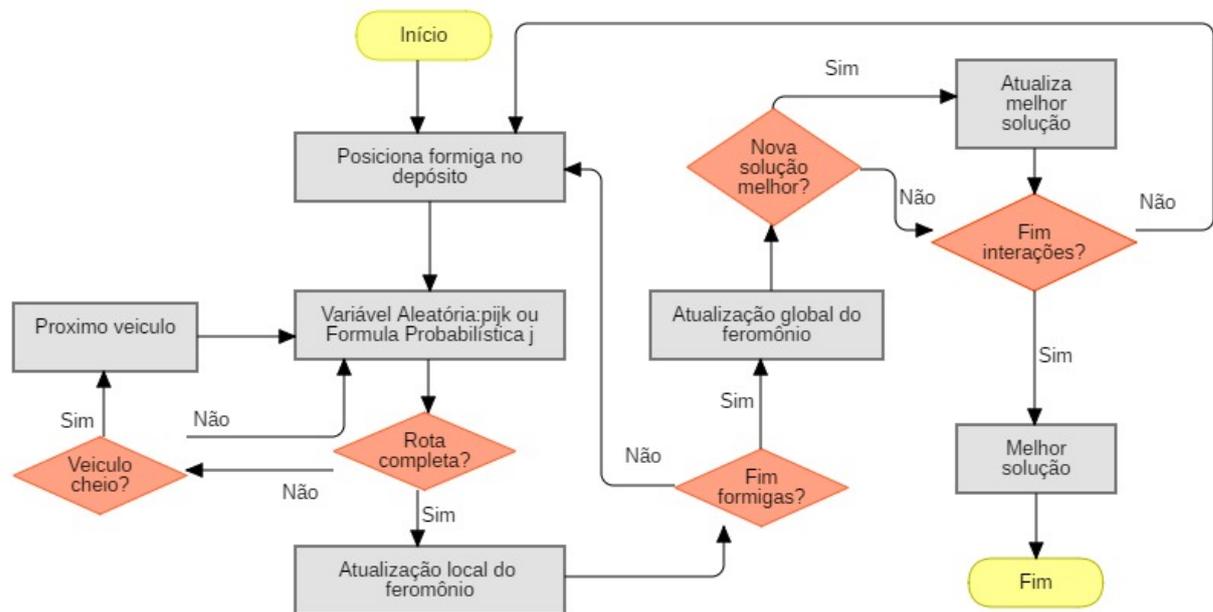
1 begin
2   Inicializar
3   while o critério de parada não é satisfeito do
4     Posicione cada formiga em um nó inicial
5     repeat
6       foreach formiga do
7         Escolha o próximo nó aplicando a formula probabilística
8         Aplicar atualização local do feromônio
9       end
10    until até que toda formiga tenha construído uma solução;
11    Atualize a melhor solução
12    Aplicar atualização de feromônio
13  end
14 end

```

---

No fluxograma, na Figura 3, pode se analisar as estruturas sequenciais no processo computacional. Ele mostra o fluxo de dados através do algoritmo. De acordo com Lima(2011, p. 260) o diagrama permite modelar o comportamento do sistema, denotando os caminhos lógicos que um processo pode seguir. Através deste pode se ter uma ideia do algoritmo em execução aplicado ao Problema de Roteamento de Veículos.

Figura 3 – Fluxograma representando o Algoritmo Colônia de Formigas aplicado ao Problema de Roteamento de Veículos.



Fonte: Elaborada pelo autor



## 4 Experimentos e Resultados

Aqui será mostrado os dados usados no processo de implementação do sistema, sua manipulação pelo algoritmo e os resultados gerados por ele.

### 4.1 Dados usados

Os dados usados foram fornecidos por um supermercado sediado na cidade de Pirapora, no estado de Minas Gerais. Os clientes do supermercado são moradores de diversos bairros da cidade. A empresa faz a entrega dos produtos comercializados e para isso utiliza-se de uma frota própria composta por 3 veículos, com capacidades distintas. A tabela 1 representa a capacidade dos veículos.

Tabela 1 – Frota de veículos

Veículos	Quantidade	Capacidade M <sup>3</sup>
Veículo 1	1	25
Veículo 2	1	15
Veículo 3	1	13

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.2 Obtenção das distâncias

Os dados utilizados na resolução do problema foram fornecidos pela empresa estudada. No entanto, durante a coleta desses dados não foi possível obter as matrizes de distância. Diante do exposto, optou-se pela utilização do Google *Geocoding API* e o Google *Distance Matrix Service* para obtenção destes dados.

O Google *Geocoding API* é um serviço que fornece geocodificação de endereços. Geocodificação é o processo de conversão de endereços (como um endereço de rua) em coordenadas geográficas (como latitude e longitude). Dessa forma, fornecendo o endereço de entrega é possível obter as coordenadas geográficas do local onde mora o cliente. O *Distance Matrix Service* do Google calcula a distância de viagem entre várias origens e destinos usando um determinado modo de viagem. Com esses dados, é montada a matriz de distância.

Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 2, junto com a carga a ser entregue em cada destino, o depósito é representado pelo local 1.

### 4.3 Configurações de Execução dos Experimentos

A geração da solução ACO para o problema foi feita usando a linguagem de programação PHP (do inglês *Personal Home Page*) em um computador Raspberry Pi 3 B+ com processador ARM Broadcom BCM2837B0 Cortex-A53 de 1.4GHz de 64 bits em Sistema

Tabela 2 – Localizações e cargas

Local	Latitude	Longitude	Carga
1	-17.3533415	-44.9166117	0
2	-17.3513891	-44.9214949	1.2
3	-17.3527779	-44.9233316	1.2
4	-17.3540896	-44.9180583	2.4
5	-17.3493612	-44.9195259	1.2
6	-17.3485162	-44.9213731	3.6
7	-17.3459424	-44.9165033	3.6
8	-17.344465	-44.9259739	7.2
9	-17.34285	-44.919166	4.8
10	-17.3401197	-44.923136	1.2
11	-17.3339131	-44.9286339	2.4
12	-17.3332051	-44.9205418	2.4
13	-17.3436325	-44.9316941	1.2
14	-17.340026	-44.9250605	2.4
15	-17.3416975	-44.9421734	2.4
16	-17.340052	-44.9444253	3.6
17	-17.3338079	-44.9342288	1.2

Fonte: Elaborada pelo autor.

Operacional Linux Kernel 4.14.79. Na solução, os seguintes parâmetros de pesquisa foram definidos com base na literatura:  $\alpha=0.1$ ,  $\beta=2.3$ ,  $q_0=0.9$ , e  $m=4$ . A execução do Algoritmo 1 consistiu em 1.000 iterações do processo de busca da melhor rota e atualização da trilha.

#### 4.4 Discussão dos Resultados

As coordenadas de localização específicas para todas as localizações e o depósito estão disponíveis na tabela 2.

Tabela 3 – Soluções encontradas

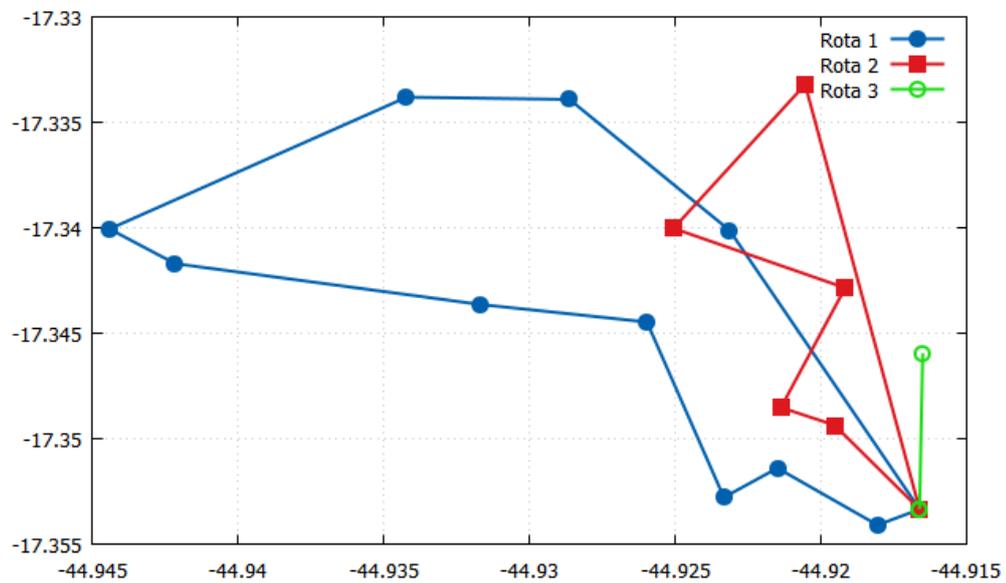
Solução	Rota	Distância
1	1,4,2,3,8,13,15,16,17,11,10,1,5,6,9,14,12,1,7,1	20544 m
2	1,4,2,3,6,5,7,9,10,14,1,15,16,17,11,12,1,8,13,1	24649 m
3	1,4,2,3,6,5,7,9,14,1,8,13,16,15,1,10,11,17,12,1	25233 m

Fonte: Elaborada pelo autor.

As 3 melhores soluções encontradas pela meta-heurística ACO estão apresentadas na tabela 3, os dados mostrados estão em metros percorridos. Também apresentam ilustração com auxílio do programa gnuplot. O gnuplot é uma ferramenta para visualizar dados e analisá-los usando gráficos. As soluções podem ser visualizadas na Figura 4,

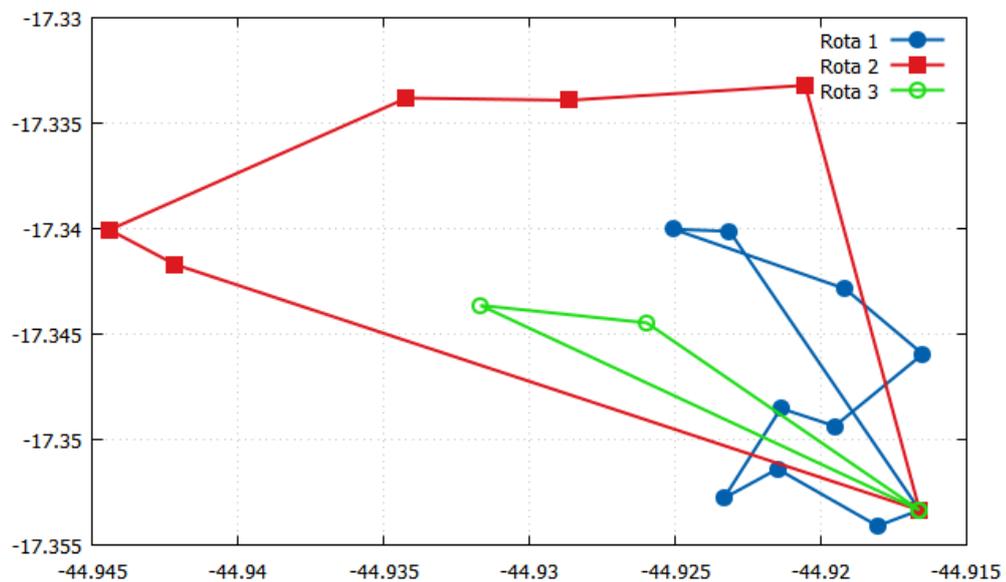
Figura 5 e Figura 6, cada polígono representa uma rota de um veículo e cada vértice representa um cliente ou depósito.

Figura 4 – Solução 1



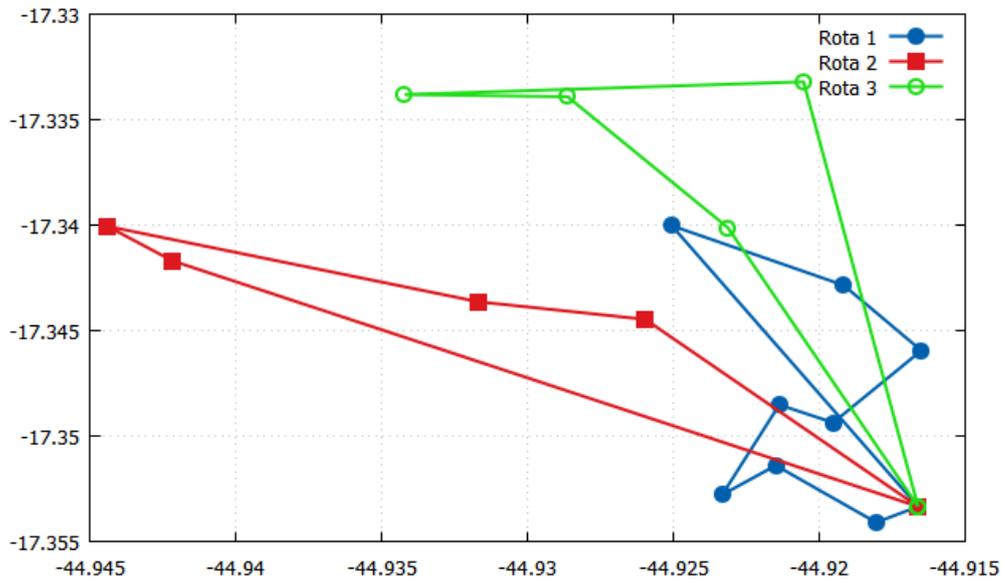
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5 – Solução 2



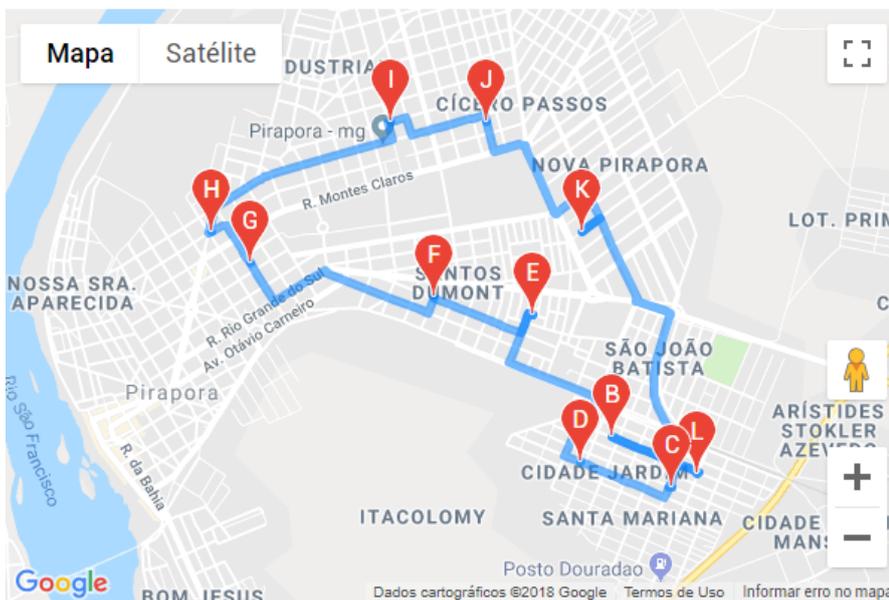
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 6 – Solução 3



Fonte: Elaborada pelo autor

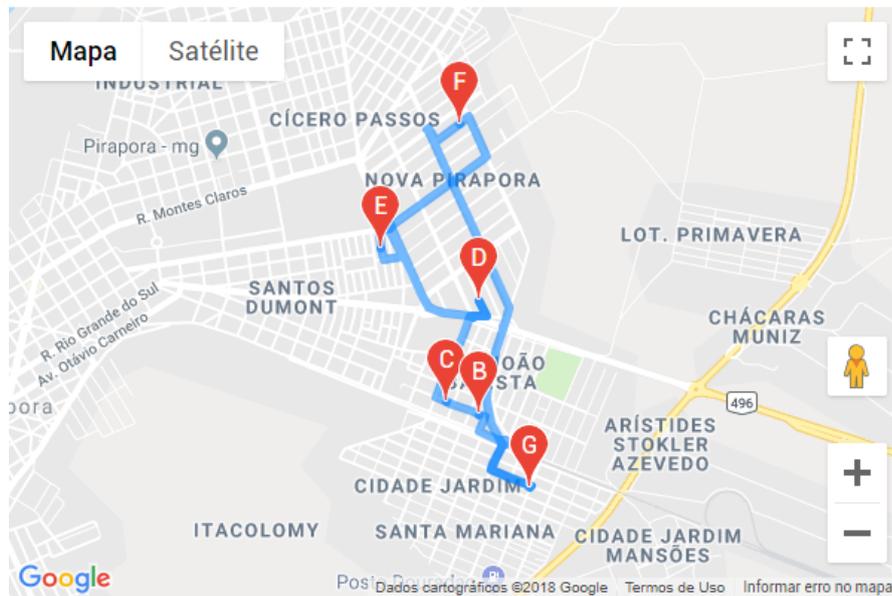
Figura 7 – Melhor solução – Rota 1



Fonte: Elaborada pelo autor

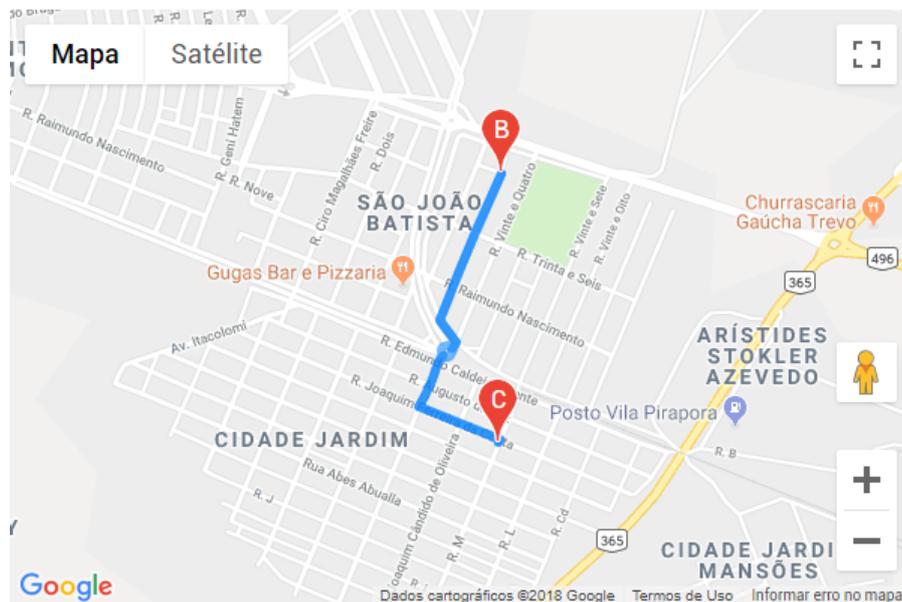
A melhor solução encontrada pelo algoritmo é exibida pelo sistema. Uma solução é formada pelas rotas de entregas que cada veículo irá fazer. Um mapa com as direções de entregas de cada rota é gerado pelo software para o planejamento das entregas. Na figura Figura 7 é mostrado o mapa da rota do veículo 1, começando pelo depósito e passando por cada endereço de entrega e voltando novamente para o depósito, representado pela letra L. Na imagem Figura 8 é mostrado o mapa da rota do veículo 2 e na imagem

Figura 8 – Melhor solução – Rota 2



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 9 – Melhor solução – Rota 3



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 9, o mapa da rota do veículo 3. As três rotas mostram graficamente a melhor solução encontrada.

A aplicação da solução utilizada mostra que é possível gerar resultados esperados, gerando rotas de entregas. Mesmo não sendo possível comparar com dados históricos anteriores, é possível afirmar que a proposta é capaz de gerar rotas de uma forma mais rápida que manualmente, além de fornecer um mapa com um caminho eficiente e direções

com pontos de rotas geocodificadas.

## 5 Conclusão

Este trabalho traz como resultado um software capaz de gerar rotas usadas para entregas de encomendas, geradas de forma automática pelo algoritmo implementado.

Os resultados revelam que, apesar da elevada complexidade computacional e enorme quantidade de operações, a abordagem ACO usada nesta pesquisa gerou soluções. Diante disso, o uso do método heurístico foi uma estratégia adequada para o trabalho, gerando boas soluções, resultando em uma possível economia de tempo e de custos de manutenção e utilização dos veículos usados para as entregas. Ferramentas como essas que encontram soluções eficazes para o PRV são desejadas pelos gestores, já que são capazes de gerar melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

### 5.1 Trabalhos Futuros

Este trabalho terá continuidade na área de logística, aplicando o algoritmo desenvolvido em outras empresas de entregas e também para coleta de encomendas, com o uso de outras técnicas de meta-heurísticas híbridas e outros procedimentos computacionais que permitam soluções mais eficientes e de menor custo computacional para esta classe de problemas.



## REFERÊNCIAS

- ALOISE, D. *et al.* Heurísticas de colônia de formigas com path-relinking para o problema de otimização da alocação de sondas de produção terrestre-spt. *XXXIV SBPO*, 2002. Citado na página 35.
- BALDACCI, R.; BATTARRA, M.; VIGO, D. Routing a heterogeneous fleet of vehicles. *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges*, Springer, p. 3–27, 2008. Citado na página 31.
- BALLOU, R. *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos*. [S.l.]: Bookman Editora, 2009. Citado na página 29.
- BELL, J. E.; MCMULLEN, P. R. Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem. *Advanced engineering informatics*, Elsevier, v. 18, n. 1, p. 41–48, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 37.
- BOWERSOX, C. *Logística empresarial: O processo de integração da cadeia de suprimento*. [S.l.]: Atlas, 2011. Citado na página 27.
- DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The truck dispatching problem. *Management science, Inform*s, v. 6, n. 1, p. 80–91, 1959. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 30.
- DENEUBOURG, J.-L. *et al.* The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. *Journal of insect behavior*, Springer, v. 3, n. 2, p. 159–168, 1990. Citado na página 33.
- FILHO, J. C. M. Otimização por colônia de formigas aplicável aos sistemas de telecomunicações. 2012. Citado na página 35.
- GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. *Computers and intractability: a guide to NP-completeness*. [S.l.]: WH Freeman and Company, San Francisco, 1979. Citado na página 32.
- GOLD, H.; CARÍĆ, T. *Vehicle Routing Problem*. [S.l.]: I-Tech Education and Publishing, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- GUTIN, G.; YEO, A.; ZVEROVICH, A. Traveling salesman should not be greedy: domination analysis of greedy-type heuristics for the tsp. *Discrete Applied Mathematics*, Elsevier, v. 117, n. 1-3, p. 81–86, 2002. Citado na página 37.
- HILLIER, F.; LIEBERMAN, G. *Introdução à Pesquisa Operacional*. AMGH, 2013. ISBN 9788580551198. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=-A88a0-KxQ0C>>. Citado na página 33.
- LIMA, F. Q. *et al.* Algoritmos para problemas reais de roteamento de veículos: Uma análise comparativa. 2005. Citado na página 27.
- MAGEE, J. *Modern Logistics Management: Integrating Marketing, Manufacturing, and Physical Distribution*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1985. Citado na página 29.
- MALAQUIAS, N. G. L. *et al.* Uso dos algoritmos genéticos para a otimização de rotas de distribuição. Universidade Federal de Uberlândia, 2006. Citado na página 34.

- MANFRIN, M. *et al.* Parallel ant colony optimization for the traveling salesman problem. In: SPRINGER. *International Workshop on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*. [S.l.], 2006. p. 224–234. Citado na página 33.
- MASIERO, L. S. Proposta de dimensionamento de frota para uma transportadora. *Projeto final do curso de Engenharia de Produção. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, 2008. Citado na página 27.
- MIYAZAWA, F. K.; SOUZA, C. C. D. Introdução a otimização combinatória. In: *Jornadas de Atualização em Informática-Congresso da Sociedade Brasileira de Computação-JAI-SBC*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 32.
- MOURA, B. *Logística: Conceitos e Tendências*. [S.l.]: Centro Atlântico, 2006. Citado na página 29.
- NETO, R. F. T.; FILHO, M. G. Otimização por colônia de formigas para o problema de sequenciamento de tarefas em uma única máquina com terceirização permitida. *Gestão e Produção*, SciELO Brasil, v. 20, n. 1, p. 76–86, 2013. Citado na página 35.
- NOGUEIRA, K. B.; AGUIAR, P. H. C. Aplicação do sistema formiga para gerência do sequenciamento de taxiamento em aeroportos. 2013. Citado na página 27.
- OLIVEIRA, D. *Planejamento estratégico: conceitos metodologia práticas*. [S.l.]: Atlas, 2007. Citado na página 27.
- PEREIRA, L. G. *Simulação estocástica e métodos heurísticos paralelizados para a resolução do problema de roteamento de veículos capacitados com base na estratégia “cluster first route second”*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012. Citado na página 30.
- SANTOS, F. V. d. A utilização da pesquisa operacional como ferramenta para redução de custos na logística de distribuição: problema de roteamento de veículos capacitados (prvc). 2014. Citado na página 35.
- TIGERLOG. *Curiosidades em Logística*. 2017. [Online; acessado 24-dezembro-2017]. Disponível em: <[http://www.tigerlog.com.br/logistica/curiosidades\\_rodoviario.asp](http://www.tigerlog.com.br/logistica/curiosidades_rodoviario.asp)>. Citado na página 28.
- VILLALOBOS, A. R. *Esquema básico de un problema PRV*. 2007. [Online; acessado 7-setembro-2018]. Disponível em: <[https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Vrp\\_esquema.png](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Vrp_esquema.png)>. Citado na página 30.