

EXPERIMENTOS COM O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS BASEADO EM CAIXEIRO VIAJANTE: UMA ABORDAGEM PELA METAHEURÍSTICA *SIMULATED ANNEALING*

Leonardo Nogueira Pizzi e Arnaldo Rabello de Aguiar Vallim Filho (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é trabalhar com o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), voltado para roteirização de veículos, que é um conhecido problema logístico de otimização combinatória. O PCV é uma aplicação clássica de Pesquisa Operacional e de Inteligência Artificial por ser um problema combinatório de alta dificuldade (NP-Difícil) e também por apresentar um desafio técnico. Assim, é geralmente tratado por meio do uso de heurísticas e metaheurísticas. A pesquisa desta Iniciação Científica baseia-se especificamente na metaheurística *Simulated Annealing*, com o propósito de utilizar um tipo de objetivo de otimização para o PCV diferente do tradicional. O objetivo de otimização desta pesquisa foi o de minimização do custo logístico total da operação, incluindo os componentes de custo de transporte, o custo de estoques em trânsito e em armazém e o custo de vendas perdidas. Foi utilizada a metodologia da Agência Nacional de Transportes Terrestres, proposta devido à greve dos caminhoneiros que ocorreu no Brasil em Maio de 2018. Para isto foi feita a implementação de um algoritmo de otimização de rotas. Partindo dessa implementação, diversos experimentos foram desenvolvidos com a proposta de comparar os resultados aqui obtidos com os resultados do objetivo tradicional de minimização da distância total percorrida. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos neste artigo.

Palavras-chave: Roteirização de Veículos. *Simulated Annealing*. Caixeiro Viajante.

ABSTRACT

The goal of this research is to work over the Traveling Salesman Problem (TSP), directed to vehicle routing. This well-known combinatorial optimization logistic problem is normally managed by means of heuristics and metaheuristics. The TSP is a classic application of Operational Research and Artificial Intelligence. It is a complex combinatorial problem (NP-hard), and presents a technical challenge. The research of this Scientific Initiation is based specifically on the Simulated Annealing metaheuristic. Its purpose is to use a type of improvement goal to the TSP that is different from the traditional one. The improvement goal used in this research was the cost minimization. It also includes the cost of the transportation, the cost of the stock in transit and the stock in the warehouse, and the cost of

the lost sales. It was used the methodology of the National Terrestrial Transport Agency (ANTT), created due to the truck drivers' strike that occurred in Brazil in May 2018. This goal was achieved through the implementation in a route optimization algorithm. Many experiments were developed from this implementation in order to compare the results achieved in this research with the results of the traditional goal, which is minimizing the total distance traveled. The aim of this research is to acquire more knowledge about the behavior of routing operations, and also the behavior of the algorithms used to solve the presented problem.

Keywords: *Vehicle Routing. Simulated Annealing. Traveling Salesman.*

1. INTRODUÇÃO

1.1 Problema de Pesquisa

Neste projeto de Iniciação Tecnológica pretende-se trabalhar com o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), voltado para a roteirização de um veículo que deve atender pontos de demanda. Este é um conhecido problema logístico de otimização combinatória que, via de regra, é tratado com o uso de heurísticas e de metaheurísticas. Por não se tratar do PCV aplicado a uma operação logística, este será tratado aqui por PCVL – Problema do Caixeiro Viajante Logístico.

O PCVL pode ser descrito como um conjunto de pontos que dispõem de uma dada demanda e devem ser atendidos por um veículo em uma rota definida. O veículo parte de um ponto de origem (um depósito), atende todos os pontos e retorna à sua origem (Ballou, 2006; Novaes, 2007). Também existem problemas com múltiplos veículos (múltiplos Caixeiro Viajante) e/ou múltiplos depósitos, mas estes não serão abordados nesta pesquisa.

O número de restrições a considerar no PCVL, em um problema real, pode ser grande, e cada tipo de restrição recebe um tratamento específico nos algoritmos de solução (Laporte, 2009). As variáveis de decisões do problema correspondem à definição das rotas a percorrer por cada veículo. O objetivo clássico da otimização é a minimização da distância total da operação. Por ser um problema combinatório de alta dificuldade (NP-Difícil), a solução é obtida com métodos heurísticos. Dado o seu desafio técnico, o PCVL acaba sendo uma aplicação clássica de Pesquisa Operacional e de Inteligência Artificial, tendo-se problemas clássicos como o Carteiro Chinês, Caminho Mínimo, Transporte e outros (Novaes, 2007; Bodin et al., 1983).

Na maior parte dos casos, o PCVL é resolvido tendo-se por objetivo a minimização da distância total percorrida pelos veículos ou o custo de transporte da operação. Entretanto, outro aspecto relevante é a segurança da operação, especialmente no Brasil, já que os índices de roubo de carga no país são elevados. Em termos de aplicações práticas, o caso mais comum é a distribuição ou a coleta urbana de carga. É o que ocorre com grandes distribuidores.

O estudo a ser desenvolvido neste trabalho é um segmento do projeto “Suíte de Soluções de Problemas Combinatórios”, que está sendo conduzido no laboratório de pesquisa BigMAAp – Big Data e Métodos Analíticos Aplicados, da Faculdade de Computação e Informática – FCI, em que é desenvolvida uma suíte de técnicas heurísticas que buscam solucionar problemas combinatórios de diversos tipos.

No caso específico desta Iniciação Tecnológica, a pesquisa se propõe a trabalhar com um algoritmo de roteirização baseado na metaheurística *Simulated Annealing*. Aqui, a ideia é utilizar um novo tipo de objetivo de otimização para o PCVL. Este objetivo irá requerer alterações no algoritmo já implementado. Experimentos com este novo objetivo serão desenvolvidos com o uso de bases de dados disponíveis em sites científicos, e os resultados serão comparados aos obtidos com o objetivo clássico de minimização da distância total percorrida na operação.

O objetivo de otimização a ser utilizado será o de minimização do custo logístico total da operação, o que inclui os componentes de custo de transporte, custo de estoque em trânsito, custo de estoque em armazém e custo de vendas perdidas. Geralmente, considera-se apenas o custo de transporte. O objetivo geral desta pesquisa é descobrir o impacto que esses novos custos podem causar nos resultados finais. Sendo assim, considerando que o objetivo da otimização foi estabelecido como a minimização do custo logístico total da operação, há o seguinte questionamento: “qual deve ser o comportamento da solução de um PCVL obtida com um algoritmo de roteirização?”. Esta pode ser definida como a pergunta central desta pesquisa.

1.2 Justificativa

O PCVL estudado neste trabalho têm enorme aplicação prática nos mais diversos tipos de operações (Ballou, 2006). A sua principal aplicação se dá em casos de entrega e coleta de carga em distribuição urbana, mas este também pode ocorrer em outros tipos de situação, como entrega de correspondência, coleta de lixo e

manutenção urbana em equipamentos (por exemplo, manutenção e abastecimento de caixas automáticos, serviços de telefonia e serviços de energia). Portanto, este é um assunto de ampla aplicação (Ballou, 2006; Bodin et al., 1983; Novaes, 2007).

Além disso, sabe-se que o transporte é o mais alto componente do custo logístico (Ballou, 2006). No Brasil, este corresponde a cerca de 60% custo logístico total, que é de 12,6% (Lima, 2006). No caso brasileiro, há o agravante da forte concentração do transporte rodoviário em detrimento de outras modalidades de deslocamento, representando mais de 60% do transporte de carga do país (CNT, 2014; Lima, 2006), o que causa um aumento no custo logístico total. Nos Estados Unidos este valor é de 8,2% (Lima, 2006). Ainda segundo Lima (2006), estima-se que o custo do transporte rodoviário no país é de mais de R\$100 bilhões por ano. Assim, redução de apenas 1% deste valor já representaria uma economia de R\$1 bilhão ao ano. Os benefícios da Roteirização são, portanto, muito significativos.

Este trabalho se justifica, pois poderá contribuir como incentivo à busca por soluções de redução do custo de transporte com a utilização de técnicas de otimização, uma vez que esta pesquisa trabalha com uma ferramenta computacional capaz de gerar rotas a um baixo custo. Outro fator a ser considerado é o fato de algoritmos de roteirização permitirem simulações de cenários, o que será feito aqui, o que seria impraticável em outras condições.

Além disso, resolver um PCVL é algo de grande complexidade, já que é um problema NP-Difícil (a mais alta classe de complexidade). Considerando os muitos desafios que ele oferece, este é pertence a uma categoria de problemas que vem sendo continuamente estudada (Laporte, 2009). Com este projeto pretende-se adquirir e gerar mais conhecimento acerca deste problema e também sobre os métodos heurísticos de solução. No caso específico do algoritmo que já está implementado, espera-se melhorar e ampliar as suas funcionalidades. Isso porque, no estágio atual, o algoritmo trabalha apenas com o objetivo tradicional de minimização da distância percorrida na operação.

Com base nestas considerações, entende-se que esta pesquisa se justifica pelo seu potencial econômico, devido à implementação de uma técnica de redução de custos logísticos, e também pelo desafio que se coloca tanto do ponto de vista científico, quanto tecnológico.

1.3 Objetivo

O objetivo geral deste projeto é a implementação em um algoritmo de otimização de rotas de um novo tipo de objetivo para a otimização. A partir dessa implementação, uma série de experimentos será desenvolvida, de forma a compará-los com os resultados do objetivo tradicional de minimização da distância total percorrida. Para isso, serão usadas bases de dados disponíveis em sites científicos na internet.

Sobre os objetivos específicos, o estudo buscará atender aos seguintes aspectos:

- Implementar em um algoritmo de otimização um novo objetivo de minimização do custo logístico total da operação, incluindo o custo de transporte, custo de estoques em trânsito em cada rota, custos do estoque no depósito e custo de vendas perdidas;
- Desenvolver experimentos com este novo algoritmo para diferentes cenários, utilizando bases de dados de testes disponíveis;
- Comparar este novo objetivo com o objetivo tradicional de minimização da distância percorrida por meio de visualizações e técnicas estatísticas.
- Aprimorar a aplicação desenvolvida com a implementação de novas saídas gráficas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O objetivo deste capítulo é apresentar as produções científicas e acadêmicas referentes ao assunto que será tratado neste estudo. O material utilizado serviu como base para realizar este projeto e proporcionou o aprofundamento teórico necessário para dar início à pesquisa. Utilizou-se, entre outros, de artigos e dissertações que tratavam do tema desta pesquisa.

2.1 Problemas de Rotas

O problema de roteirização de veículos (conhecido também como Vehicle Routing Problem - VRP) é um dos mais importantes nas áreas de logística e otimização. Constatou-se que este tema, apesar de tão amplo e significativo dentro de empresas e instituições, ainda tem muito a ser explorado. Pretende-se por meio deste trabalho contribuir com as pesquisas desse ramo.

Nas palavras de Wu,

a roteirização de veículos pode ser definida como o atendimento de nós de demanda geograficamente dispersos, sendo que, para cada ligação entre um par de nós, há distâncias e custos associados. A fim de atendê-los,

utiliza-se uma frota de veículos disponíveis que partem e retornam a um depósito central. O objetivo é determinar o conjunto de rotas de menor custo que atenda às necessidades dos nós, respeitando restrições operacionais, tais como capacidade dos veículos, duração da rotas, janelas de tempo, duração da jornada de trabalho, entre outros. (2007, p.5)

O problema do caixeiro viajante (PCV) foi o primeiro a ser estudado e, ainda hoje, é um dos dilemas utilizados como forma de aprimorar as soluções dos VRP. Este problema é atualizado constantemente a fim de atender às necessidades que surgem ao longo do tempo, de modo a se adequar e tentar solucionar os diversos problemas de roteiro. Gomes (2008) disse que o PCV “pode ser entendido como o problema de um vendedor que deseja visitar um conjunto de cidades, passando exatamente uma vez cada cidade, voltando ao ponto de partida no final do seu percurso”.

Outro conceito importante para os estudos nessa área é o de classes de complexidade de problemas, uma vez que os problemas aqui estudados se enquadram na classe NP-Difícil, a mais alta classe de complexidade. Dentro dessa categoria, o esforço computacional para resolver os problemas cresce exponencialmente em relação ao aumento da dimensão destes. Problemas mais complexos, encontrados em aplicações práticas, exigem tanto poder de processamento que mesmo os mais potentes computadores da atualidade não seriam capazes de resolvê-los de forma satisfatória em tempos aceitáveis de processamento. Os problemas do caixeiro viajante e da roteirização de veículos se enquadram na categoria NP-Difícil e “podem ser formulados como problemas de programação linear inteira” (WU, 2007, p.6), mas o tempo computacional para resolvê-los por esta técnica tenderia para infinito à medida que a dimensão dos problemas crescesse.

Bott e Ballou (1986, apud HAMACHER; REBELLO, 2009) classificam as estratégias de resolução de problemas genericamente em métodos exatos ou ótimos, métodos iterativos, métodos heurísticos e métodos combinados. Cada um deles foi elaborado visando resolver tipos diferentes de problema.

Do ponto de vista prático, para Ballou (2006) os gestores de operações envolvendo rotas de veículos, como é o caso de frotistas, podem ter significativas melhorias em sua operação, no que tange à geração de “boas” rotas e programação de viagens aplicando-se oito princípios básicos na construção dessas rotas:

- Carregar caminhões com volumes destinados a paradas que estejam mais próximas entre si;

- Paradas em dias diferentes devem ser combinadas para produzir agrupamentos concentrados;
- Comece a construção do roteiro a partir da parada mais distante do depósito;
- O sequenciamento das paradas num roteiro deve ter forma de uma “gota”;
- Os roteiros mais eficientes são aqueles que alocam primeiro às rotas os maiores veículos possíveis;
- As coletas devem ser combinadas nas rotas de entregas, ao invés de serem reservadas para o final dos roteiros;
- Uma parada removível de um agrupamento de rota é boa candidata a um meio alternativo de entrega;
- As pequenas janelas de tempo de paradas devem ser evitadas. (apud VALLIM; MATHIAS, 2009, p.8-9)

No que tange ao tempo computacional, o que pode contribuir para sua diminuição é a utilização de heurísticas e metaheurísticas. De acordo com Cunha (1997, apud WU, 2007, p.6): “Essas estratégias de solução se baseiam em abordagens intuitivas, de modo que a estrutura particular do problema pode ser considerada e explorada de forma inteligente”. Cada problema conta com uma solução específica - as soluções baseadas em heurísticas não conseguem produzir soluções tão eficazes para os problemas que exigem restrições diferentes daquelas que foram levadas em conta quando a estratégia foi planejada.

Dentro dos problemas de roteirização de veículos existe aquele com Janela de Tempo (PRVJT). De acordo com Alvarenga (2005, p.9), esse tipo de problema, “além da limitação de capacidade, inclui a restrição do intervalo de tempo para atendimento”. A janela de tempo é o intervalo em que o veículo dispõe para sair do seu centro de distribuição, chegar ao consumidor e, então, iniciar o serviço de carga e descarga dos produtos. Violar essa janela de tempo (antes de sua abertura, ou após o seu fechamento) implica em custos adicionais. Apesar de o assunto já ter sido bastante explorado, ele ainda demanda maiores pesquisas devido ao impacto direto na diminuição de custos para as empresas e instituições de transporte.

Os problemas de roteirização já vêm sendo estudados há tempos e, atualmente, os mais clássicos ainda servem como material de estudo para quem se debruça sobre esse assunto. Alguns autores conseguiram desenvolver métodos bem aceitos, sendo eles: Heurística de Ganhos (CLARKE; WRIGHT, 1963); Heurística de Varredura (GILLET; MILLER, 1974); Meta-heurística têmpera simulada (REEVERS, 1993); e Meta-heurística Método da Lista “Tabu” (GLOVER, 1986). Os métodos dos

Ganhos e da Varredura são considerados por Crainic e Laporte (1997) como os mais clássicos e o método da Lista Tabu como o mais moderno. Quando se trata de problemas de janela de tempo, Belfiore e Fávero (2006) indicam os seguintes métodos como os mais utilizados: Heurística de Ganhos; Heurística do Vizinho Mais Próximo; Heurística de Inserção; e Heurística de Varredura (apud VALLIM; MATHIAS; 2009, p.9-10).

2.2 Metaheurística *Simulated Annealing*

Sobre metaheurísticas aplicadas à solução de problemas de rotas, a metaheurística do Recozimento Simulado (*Simulated Annealing* - SA) é uma que tem apresentado bons resultados. Esta metaheurística é uma analogia com a termodinâmica, sendo uma metáfora de um processo térmico, conforme Vallim Filho e Gualda (2006) que a explicam detalhadamente. Os autores colocam que o SA é uma analogia a um processo físico, o *annealing* (ou recozimento), que é um processo no qual um material sólido é aquecido a uma temperatura em que todas as suas partículas se dispõem aleatoriamente num estado líquido, seguido por um resfriamento muito lento para atingir um equilíbrio térmico a cada temperatura. Os autores continuam, explicando que o resultado é um material consistente e rígido. Em uma analogia com problemas de otimização combinatória, cada estado do sistema físico (uma configuração das partículas do sistema) corresponde a uma solução viável do problema de otimização e uma função objetivo a ser estimada pode ser considerada como a energia do sistema interno. O valor da função objetivo corresponde ao nível de energia. A energia mínima é atingida pela solução ótima. De acordo com Vallim Filho e Gualda (2006) SA é, portanto, uma simulação analítica do processo de recozimento. Ele combina o uso de uma técnica de simulação com um plano de recozimento, de temperatura em declínio.

Conforme D'Amico et al. (2002), no algoritmo de SA parte-se de uma solução inicial e de uma "temperatura" inicial, e desenvolve-se então em um processo iterativo em que a cada nível de "temperatura" são introduzidas pequenas "perturbações" na configuração do sistema e computa-se o valor da função objetivo. No caso de minimização se o valor for menor, se aceita a nova configuração. Se a função objetivo aumentar de valor, gerando uma solução "inferior", a nova configuração também poderá ser aceita, mas com uma probabilidade que é determinada pela diferença entre os dois valores da função objetivo e pelo valor da "temperatura" do sistema naquela iteração.

O SA exige um processo sistemático, com um componente aleatório, para se escolher a nova configuração a cada iteração. Com isto, o comportamento da SA pode ser modelado como uma sucessão de cadeias de Markov, uma para cada valor de temperatura, em que cada mudança de configuração corresponde a um estado do sistema. Ao final do processo as soluções devem convergir para um único valor, a exemplo do que ocorre em uma cadeia de Markov em que a longo prazo as probabilidades de mudança de um estado para outro convergem para uma probabilidade limite.

A probabilidade de aceitação de uma mudança é chamada de “critério de Metropolis” e é calculada a partir do “Fator de Boltzman (B)”, que é dado pela função 2.1:

$$B = \exp(-\Delta E/T) \quad (2.1)$$

onde:

T = temperatura atual;

$$\Delta E = v(s) - v(s_0) \quad (2.2)$$

sendo:

$v(s)$ = valor da função objetivo da configuração em teste;

$v(s_0)$ = valor da função objetivo da configuração atual.

Em SA o valor de B é comparado a um número n_0 entre 0 e 1 gerado aleatoriamente. Se $B > n_0$ então a nova configuração será aceita.

Inicialmente a temperatura T é colocada em um valor bem alto. Assim, a mudança de s para s_0 ocorre com freqüência. Conforme T vai diminuindo B também diminui e as aceitações de soluções “inferiores” passam a ser mais raras. Quando T está muito baixa e por muitas iterações não ocorrem mudanças, considera-se que a solução está “congelada” e o processo é encerrado.

Os parâmetros de controle de SA são: temperatura inicial, taxa de resfriamento, número de iterações a cada temperatura, número de transições a cada temperatura e número total de iterações. A determinação destes parâmetros deve seguir certas diretrizes, de forma a garantir o sucesso do método (Viana, 1998). Estas diretrizes em conjunto com o processo de experimentação levam à definição dos parâmetros.

3. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

3.1 Metodologia do Estudo

Inicialmente, em termos de classificação da pesquisa desenvolvida neste projeto trata-se de uma pesquisa aplicada, já que sua utilização prática é total. O estudo adotou uma abordagem quantitativa, baseada em um algoritmo de otimização e custos logísticos da operação, e sua finalidade foi o aperfeiçoamento e ampliação de uma ferramenta computacional, incluindo a implementação dessas melhorias. Sobre os meios utilizados no estudo, foi feita uma revisão bibliográfica do tema e foram usadas bases de dados disponíveis à comunidade científica que foram usadas para comparação de algoritmos.

O desenvolvimento deste estudo se deu segundo as etapas abaixo:

- Pesquisa bibliográfica: análise das publicações correntes na área de metaheurísticas e roteirização de veículos;
- Identificação de bases de dados de testes para o PRV: pesquisa aprofundada sobre os padrões clássicos para estabelecer comparações entre os algoritmos utilizados;
- Tratamento das bases de dados para uso na pesquisa: exploração e escolha dos dados mais indicados para demonstrar com clareza as análises realizadas neste estudo;
- Implementação e testes de novas funcionalidades no algoritmo (caso necessário): alterações foram realizadas nesta etapa para introduzir no algoritmo um novo tipo de objetivo de otimização. Um conjunto de testes foi desenvolvido para garantir que a implementação estivesse plenamente operacional;
- Planejamento do experimento e execução dos experimentos: depois de reunidos os dados e os algoritmos, teve início o planejamento da execução dos experimentos. Os experimentos foram executados e os resultados obtidos foram registrados. A partir disso, as análises foram iniciadas;
- Tratamento estatístico e visual dos resultados: elaboração da base de dados obtidos a partir dos resultados dos experimentos realizados anteriormente. Preparação de visualizações dos resultados e desenvolvimento de análises estatísticas;
- Documentação, desenvolvimento de artigo científico e de relatório final: preparação da versão final e completa do artigo científico e do relatório fundamentados nos estudos realizados ao longo do processo.

3.2.1 Desenvolvimento da Modelagem

A modelagem proposta partiu de um algoritmo já implementado que utiliza a metaheurística *Simulated Annealing* (SA) para estabelecer a rota ótima para um PCV. A aplicação recebe dados de um conjunto de nós e ligações de uma rede, e dos custos dessas ligações. A rota ótima é estabelecida com base em uma função objetivo que corresponde à distância total percorrida na rota, e o objetivo é de minimização dessa distância total.

Na presente pesquisa tem-se como ponto chave uma proposta de uma função objetivo que retrate o custo logístico total da operação. Este custo é determinado para cada ligação da rede de forma exógena à implementação do algoritmo de otimização, e pode considerar diferentes componentes de custo logístico, tais como transporte e estoque em trânsito, entre outros. Na proposta o algoritmo recebe como dado de entrada uma matriz com os custos logísticos de cada ligação da rede, e com base nesses dados e nos dados da própria rede, busca a minimização do custo global da rota.

Além disso, a própria aplicação foi aprimorada, tendo sido desenvolvidas novas funcionalidades que passaram a possibilitar novas saídas gráficas, assim como as novas métricas de desempenho dos resultados que considera o novo objetivo de otimização.

Considerando-se uma rota com “n” nós, sendo atribuído ao nó inicial do percurso o índice 0, e sendo o nó “i+1” o nó seguinte ao nó “i” em um dado percurso,

$$\text{Mín} \left(\sum_i D_{i,i+1} \cdot C_{i,i+1} \right) + D_{n0} C_{n0} ; \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (3.1)$$

onde:

$D_{i,i+1}$ = distância da ligação entre os nós i e i+1

D_{n0} = distância da ligação entre o último nó (n) da rota e o nó de origem (0)

$C_{i,i+1}$ = custo unitário logístico da ligação entre os nós i e i+1

C_{n0} = custo unitário logístico da ligação entre o último nó (n) da rota e o nó de origem (0)

3.3 Desenvolvimento do Experimento

Para aplicação da modelagem proposta foi desenvolvido um experimento com a utilização de uma base de testes pública muito utilizada como padrão para comparação de algoritmos (*benchmarking*). Esta base de dados foi proposta por

Chistofides et al. (1979) e é composta por 101 pontos e amplamente usada em estudos de roteamento. A base foi obtida no repositório “VRP-REP: The vehicle routing problem repository”¹.

Com a finalidade de calibrar o algoritmo com o *Simulated Annealing* (SA) implementado foram realizados 20 testes para cada conjunto de variáveis do algoritmo, dentre 15 diferentes combinações de parâmetros, totalizando 300 testes, almejando sempre o equilíbrio entre o tempo de processamento e o percentual de redução de custos nas rotas geradas.

Conforme já descrito na seção 2.2, os parâmetros a considerar na metaheurística SA são: temperatura inicial, número máximo de iterações em cada temperatura, número máximo de sucessos em cada temperatura, número total de iterações e método de resfriamento.

A definição desses parâmetros é ponto chave para o sucesso do método, e neste experimento foram testadas diferentes configurações desses parâmetros até que atingissem valores satisfatórios. Definidos os “melhores” valores para os parâmetros do SA, o experimento pode ser desenvolvido.

No que diz respeito à base de custos logísticos necessários para alimentar o modelo, neste experimento foram considerados exclusivamente os custos de transporte, e para tanto, utilizou-se a metodologia de cálculo de fretes, proposta pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), na resolução número 5.820², que instituiu a Política de Preços Mínimos do Transporte Rodoviário de Cargas, e que foi emitida em decorrência da recente greve dos caminhoneiros ocorrida no país, no mês de maio de 2018. Fundamentado nos parâmetros apresentados na resolução, foi possível empregar a metodologia para definir custos por quilômetro rodado.

A seguir, é possível visualizar detalhadamente os procedimentos de cálculo de custos fixos (tabela 1a) e custos variáveis (tabela 1b) de um veículo. Estes custos definiram os parâmetros a serem utilizados no experimento. Os cálculos foram baseados na metodologia da ANTT (ANTT, 2018).

¹ Plataforma aberta de dados de compartilhamento de instâncias de problemas de roteirização de veículos, para utilização em benchmarking de técnicas de soluções para este tipo de problema e outros problemas similares. Disponível em: <<http://www.vrp-rep.org/datasets/item/2014-0002.html>>.

²ANTT – RESOLUÇÃO Nº 5.820, de 30 de maio de 2018. Estabelece a metodologia e publica a tabela com preços mínimos vinculantes, referentes ao quilômetro rodado na realização de fretes, por eixo carregado, instituído pela Política de Preços Mínimos do Transporte Rodoviário de Cargas. Agência Nacional de Transportes, 30 de maio de 2018.

Para cômputo desses custos foi considerado um veículo médio (capacidade de 12t) cujas características e custos de insumos foram obtidos em fornecedores e portais do mercado de transportes de carga.

Na sequência (tabela 1c) pode ser visto um resumo dos resultados de custos das tabelas 1a e 1b, e também o cômputo de um custo total por km rodado que foi um parâmetro de entrada do algoritmo utilizado no experimento.

Tabela 1a – Planilha de Custos Fixos de um Veículo de Carga

Base: Metodologia ANTT (ANTT, 2018)

Custos Fixos			
1. Reposição do Veículo		5. Tributos sobre o Veículo	
Vr. do Veículo	230.000,00	Vr. do Veículo	230.000,00
Valor Residual do Veículo	60%	% de IPVA	3%
Perda durante a Vida Útil	92.000,00	Custo Anual de IPVA	6.900,00
Vida Útil (meses)	72	DPVAT + Licenciamento	200,00
Custo Mensal de Reposição do Veículo	1.277,78	Custo Anual (c/ DPVAT e Licenciamento)	7.100,00
2. Reposição do Equipamento de Carga		Custo Mensal de Tributos	591,67
Vr. do Equipamento de Carga	35.000,00	6. Riscos de Acidentes e Roubo do Veículo	
Valor Residual do Equipamento de Carga	10%	Importância Segurada	230.000,00
Perda durante a Vida Útil	31.500,00	% Seguro do Veículo	3%
Vida Útil (meses)	84	Custo Anual	6.900,00
Custo Mensal de Reposição do Equipam.	375,00	Custo Mensal de Riscos do Veículo	575,00
3. Remuneração Mensal de Capital		7. Riscos de Acidentes e Roubo do Equipamento de Carga	
Valor do Veículo	220.000,00	Importância Segurada	35.000,00
Valor do Equipamento de Carga	35.000,00	% Seguro do Equipamento de Carga	6,5%
Vr. do 3o Eixo	10.000,00	Custo Anual	2.275,00
Total	265.000,00	Custo Mensal de Riscos do Equipamento	189,58
Taxa Anual de Juros	12%	Custo Fixo Mensal Total	
Custo Mensal de Capital	2.650,00	9.934,03	
4. Custos de Mão de Obra de Motorista			
Salário Nominal de Motorista	1.500,00		
Reserva de Encargos Sociais	90%		
No. de Motoristas por Veículo	1,5		
Custo Mensal de Motorista	4.275,00		

Tabela 1b – Planilha de Custos Variáveis de um Veículo de Carga

Base: Metodologia ANTT (ANTT, 2018)

Custos Variáveis			
1. Manutenção		4. Lavagem e Graxas	
Vr. do Veículo + Equipamentos	265.000,00	Preço da Lavagem	300,00
Índice de Manutenção	1,0%	Km entre Lavagens	4.000
Custo Mensal de Manutenção	2.650,00	Custo de Lavagens / Km	0,08
Km Média Mensal do Veículo	8.000	5. Pneus e Recauchutagens	
Custo de Manutenção / Km	0,33	Preço de um Pneu	1.000,00
2. Combustível		Preço de Câmara	75,00
Preço do Combustível (R\$/l)	3,00	Preço de Protetor	25,00
Rendimento (Km/l)	5,0	Preço Total de um Pneu	1.100,00
Custo de Combustível / Km	0,60	Perda de Pneus (Acidentes)	3%
3. Lubrificantes		Custo de Pneu com Perda	1.133,00
Óleo de Motor		Preço de Reforma de Pneu	250,00
Preço por Litro de Óleo	30,00	No. de Reformas por Pneu	2
Capacidade do Carter	14	Custo de Reformas de Pneu	500,00
Litros por Reposição	1	No. de Câmaras Adicionais por Pneu	1
No. de Reposições	9	Custo de Câmaras Adicionais por Pneu	75,00
Total de Litros (Troca + Reposições)	23	No. de Protetores Adicionais por Pneu	1
Custo Total (Troca + Reposições)	690,00	Custo de Protetores Adicionais por Pneu	25,00
Km de Troca	10.000	Custo Total por Pneu	1.733,00
Custo de Óleo de Motor / Km	0,069	No de Pneus por Veículo	11
Óleo de Transmissão		Custo Total de Pneus por Veículo	19.063,00
Preço por Litro de Óleo	40,00	Vida Útil de Pneus	150.000
Capacidade do Câmbio + Diferencial	20	Custo de Pneus / Km	0,127
Custo Total	800,00	Custo Variável Total / Km	
Km de Troca	20.000	1,24	
Custo de Óleo de Transmissão / Km	0,0400		
Custo de Óleos / Km	0,109		

Os custos fixos do veículo são calculados em uma base mensal e são expressos em R\$/mês. Os custos variáveis do veículo são calculados em uma base quilométrica, sendo expressos em R\$/km.

Tabela 1c – Planilha Resumo de Custos de um Veículo e Custo Total por Km

Base: Metodologia ANTT (ANTT, 2018)

Resumo		
Custos Fixos		%
1. Reposição do Veículo	1.277,78	13%
2. Reposição do Equipamento de Carga	375,00	4%
3. Remuneração Mensal de Capital	2.650,00	27%
4. Custos de Mão de Obra de Motorista	4.275,00	43%
5. Tributos sobre o Veículo	591,67	6%
6.1 Riscos de Acidentes e Roubo do Veículo	575,00	6%
6.2 Riscos de Acidentes e Roubo do Equip. Carga	189,58	2%
	9.934,03	100%
Custos Fixos		%
1. Peças e Material de Manutenção	0,33	27%
2. Combustível	0,60	48%
3. Óleo Lubrificante	0,109	9%
4. Lavagem	0,08	6%
5. Pneus	0,13	10%
	1,24	100%
Custos Finais		
Km por Mês	8.000	
C. Variável por Km	1,24	
	<i>C. Variável Mensal</i>	9.938,69
	<i>C. Fixo Mensal</i>	9.934,03
C. Mensal TOTAL : Fixo + Variável		19.872,72
C. KM TOTAL : Fixo + Variável		2,48

Segundo a ANTT (2018), o custo de cada faixa de distância (C_{km}) deve ser determinado pela equação 3.2:

$$C_{km} = (CF/n + CV \cdot d)/CAP \quad (3.2)$$

onde:

CF = Custo Fixo do veículo (R\$/mês); **n** = nº de viagens que o veículo é capaz de efetuar por mês;

CV = Custo variável do veículo (R\$/km); **d** = distância da viagem (km);

CAP = Capacidade efetiva do veículo (t).

O número de viagens por mês (**n**) que o veículo tem condições de efetuar para cada faixa de distância é dado pela equação 3.3:

$$n = H / (T_{cd} + d/v) \quad (3.3)$$

onde:

v = velocidade média de viagem (km/h); **T_{cd}** = Tempo de carga e descarga (h);

H = Número de horas trabalhadas por mês.

As características da operação a ser considerada no experimento são apresentadas na tabela 2a. Para estes parâmetros foram adotados dados padrões do mercado de transporte de carga.

Tabela 2a - Características da operação simulada no estudo

Capacidade do Veículo (t)	12,0	<i>parâmetro de entrada</i>
Tempo de Carga e Descarga por Viagem (h)	6,0	<i>parâmetro de entrada</i>
Horas Trabalhadas por mês por Veículo (h)	200,0	<i>parâmetro de entrada</i>
Velocidade Média de Viagem (km/h)	50,0	<i>parâmetro de entrada</i>
Custo Fixo do Veículo por Mês (R\$/mês)	9.934,03	<i>calculado pela Planilha acima</i>
Custo Variável do Veículo por Km (R\$/km)	1,24	<i>calculado pela Planilha acima</i>

Isto posto, foram criadas 5 faixas de distância a serem utilizadas no algoritmo. Para cada faixa foram aplicados os cálculos apresentados nas equações 2 e 3.

Os custos por faixa de distância são apresentados a seguir na tabela 2b:

Tabela 2b – Custos por Faixas de Km utilizados no algoritmo

Distância da Viagem (km) Faixa em Km		Km Média	Custo Total por Ton.Km (R\$/t.km)
0	20	10,0	2,67
20	40	30,0	1,01
40	60	50,0	0,68
60	80	70,0	0,54
80	100	90,0	0,46

Note-se que o custo por faixa de distância é apresentado em R\$ por tonelada por quilômetro rodado, considerando assim, a demanda (medida em toneladas) de cada nó da rede. Porém, para efeito do experimento desenvolvido nesta pesquisa, foi adotada uma demanda unitária em cada nó.

Note-se também que à medida que as distâncias aumentam, os custos unitários sofrem uma redução sensível, chegando a um valor de R\$0,46 na última faixa, contra R\$2,67 na primeira faixa de distância. Um valor quase 6 vezes menor. Este comportamento espelha o ganho de escala que se tem com o aumento da produção de transporte (km rodados) tendo-se mais quilômetros percorridos para a distribuição do custo fixo mensal por km.

Este comportamento é uma indicação de que uma função objetivo que considere diferentes parâmetros de custo por faixa de distância, passa a ter características de otimização distintas de algoritmos que consideram objetivos

baseados exclusivamente em distância ou objetivos que consideram apenas um custo médio por quilômetro rodado que seja independente da distância percorrida na operação. Aplicando-se os custos da tabela 2b, deve-se ter um nível de representação de custos da operação sensivelmente mais detalhado, e consequentemente, tende a ser mais realista, representando assim, um aprimoramento na modelagem do problema.

O algoritmo calcula a distância entre os nós vizinhos i e $i+1$ da rota (nós em sequência) e multiplica essa distância pelo custo por km da faixa de distância correspondente. Com isto, tem-se o custo da ligação. Somando-se os custos de todas as ligações tem-se o custo total da rota. O algoritmo busca minimizar esse custo, conforme visto na equação 3.1.

Para essa implementação foi utilizada a linguagem de programação Python, com a biblioteca Matplotlib, que oferece recursos gráficos e formas avançadas de análise de dados.

4. RESULTADOS FINAIS

O experimento foi desenvolvido com a base de dados proposta por Chistofides et al. (1979) que é composta por 101 pontos, com suas respectivas coordenadas. É uma base de testes amplamente utilizada em estudos de roteamento. Para esta base, foi desenvolvida uma bateria de 300 testes que utilizaram a mesma solução inicial de entrada para o algoritmo. Todos os testes partiram do mesmo conjunto de parâmetros do SA, que já haviam sido estabelecidos anteriormente, a partir de um outro conjunto de testes já descrito na seção 3.3.

Os resultados obtidos a partir desses testes mostraram de forma geral, reduções significativas no custo total da operação ao se atingir a solução “ótima” de cada rodada do algoritmo.

Os resultados finais do experimento de 300 testes oscilaram entre um mínimo de 72,87% de redução do custo total da operação até um máximo de 77,47% de redução desse custo, em relação à solução inicial. Em termos médios a redução de custos foi de 75,61% em comparação com a rota inicial.

Os resultados médios dessa bateria de testes são apresentados na sequência:

- Custo original da operação: R\$ 83.921,52;
- Custo Médio Final da operação, após otimização: R\$ 20.469,56;
- Custo Médio Otimizado resultou em valor 4,1 vezes menor que o inicial;
- Redução Média Absoluta de R\$ 63.451,96;
- Redução Média Percentual de 75,61%.

A título de ilustração desses resultados são apresentadas a seguir saídas gráficas que foram implementadas na aplicação para que se possam visualizar os resultados obtidos.

Na figura 3a, é possível se visualizar a rota original que é um dado de entrada do algoritmo (solução inicial sem otimização). Note-se que nessa solução inicial tem-se muitos cruzamentos entre ligações.

A figura 3b apresenta a rota da solução “ótima” de um caso típico do processo de otimização aplicado aos dados, pelo algoritmo. Observe-se que após a aplicação do algoritmo, que considera o objetivo proposto neste estudo, percebe-se já de forma visual que se tem uma solução melhor que a solução inicial, pois se verifica uma redução significativa de cruzamentos nas ligações entre as ligações da rota otimizada gerada. Os resultados de custos totais da operação determinados em cada rodada do algoritmo comprovam essa impressão visual.

Fig. 3a – Rota original – solução inicial:

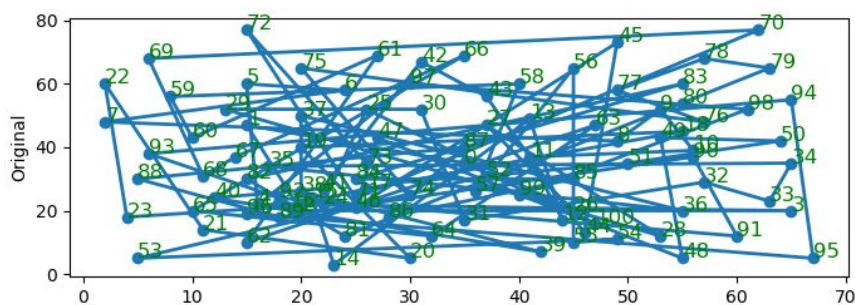
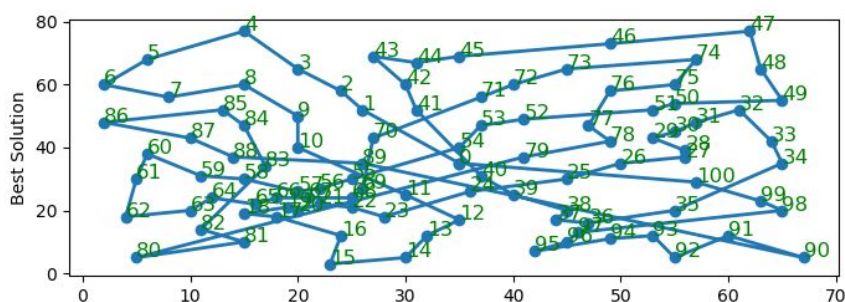


Fig. 3b – Rota final, após aplicação do algoritmo:



Pelos resultados obtidos verifica-se, portanto, que o algoritmo implementado trouxe ganhos de custos para a operação testada.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos a partir deste estudo propiciaram novos conhecimentos sobre o funcionamento da roteirização de veículos e uma melhor compreensão do algoritmo utilizado, o *Simulated Annealing*, na solução do problema de pesquisa,

As novas alterações implementadas no código original permitiram uma visualização mais precisa de cada etapa da execução do algoritmo, e também foi possível a geração de representações gráficas das rotas geradas, de forma a se comparar de forma visual a rota inicial (sem otimização) com a rota final (otimizada).

O objetivo empregado no algoritmo considerou em sua Função Objetivo a variável distância cartesiana e parâmetros de custos relativos ao transporte, por faixas de distância, conforme o padrão proposto recentemente pela ANTT, tendo-se assim, um objetivo de otimização alinhado de forma realista com a conjuntura atual do transporte rodoviário de carga no país.

Em comparação ao objetivo clássico de minimização de distâncias, tem-se neste objetivo baseado em custos uma evolução, já que no objetivo de minimização de custos, este varia por faixa de distância, o que significa um “peso” diferenciado para cada distância. Ao se tratar exclusivamente com distâncias tem-se como hipótese que não há diferença entre uma ligação com uma distância curta (por exemplo, 10 km) e outra com distância mais elevada (por exemplo, 100 km). Sob esta hipótese todas as ligações são iguais sob o ponto de vista de otimização. Observou-se entretanto, que há uma diferença significativa de custos entre ligações curtas e ligações longas em proporção muito superior ao aumento de distância. Esta análise de custos e sua inclusão no processo de otimização, poderia assim, ser considerada uma contribuição a este campo de estudo.

Como recomendação final para continuidade deste estudo, sugere-se que se implemente novos componentes de custos logísticos no custo total da operação, uma que o algoritmo já está preparado para tal. A implementação de novas metaheurísticas com a finalidade de comparação entre as mesmas também seria um possível caminho a ser seguido para continuidade deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARENGA, G. B. “Um Algoritmo Híbrido para o Problema de Roteamento de Veículos Estático e Dinâmico com Janela de Tempo”. 2005. 180 p. Tese (Doutorado em Ciências da Computação) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/RVMR-EAKH8/guilherme_bastos.pdf?sequence=1>. Acesso em março de 2017.
- ANTT (2017). Registro Nacional de Transporte Rodoviário de Cargas – RNTRC em Números. Agência Nacional de Transportes Terrestres. Brasília. Disponível em <http://appweb2.antt.gov.br/rntrc_numeros/rntrc_IdadeVeiculoMedia.asp>. Capturado em 02/04/2017.
- ANTT (2018). RESOLUÇÃO nº 5.820, de 30 de maio de 2018. Estabelece a metodologia e publica a tabela com preços mínimos vinculantes, referentes ao quilômetro rodado na realização de fretes, por eixo carregado, instituído pela Política de Preços Mínimos do Transporte Rodoviário de Cargas. Diário Oficial da União, Brasília, 30 de maio de 2018.
- BALLOU, R.H. “Gerenciamento da cadeia de suprimentos/ Logística empresarial”, 5a Edição. Porto Alegre: Bookman Editora, 2006.
- BALDACCI, R.; CHRISTOFIDES, N.; MINGOZZI, A. “An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts”, Math. Programming Ser. p. 351–385, 2008.
- BARBOSA, Thiago de Souza. “O uso de uma heurística inteligente de solução inicial para o problema de roteirização de veículos”. Faculdade de Computação e Informática da Universidade Presbiteriana Mackenzie. 2012.
- BODIN, L.; GOLDEN, B.; ASSAD, A. e BALL, M. “Routing and scheduling of vehicles and crews: The State of the Art”. *Computers and Operations Research*, p.63-211, 1983.
- CHRISTOFIDES, N. 1979. “VRP-REP: The vehicle routing problem repository”. Disponível em: <<http://www.vrp-rep.org/datasets/item/2014-0002.html>>. Acesso em Fevereiro de 2018.
- CNT. Plano CNT de Transporte e Logística 2014. Confederação Nacional do Transporte. Brasília. 752 p, 2014.
- CUNHA, C. B.. “Aspectos Práticos da Aplicação de Modelos de Roteirização de Veículos a Problemas Reais”. Departamento de Engenharia de Transportes Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000. Disponível em: <<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/188/170>>. Acesso em março de 2017.

D'AMICO, S. J.; SHOUU-JIUN, W.; BATTA, R.; RUMP, C. M. "A simulated annealing approach to police district design". *Computers and Operations Research*. Vol. 29, p. 667-684, 2002.

GOMES, C. S. A.. "Problema do caixeiro viajante - resolução e depuração". 78 p. Dissertação (Mestrado em Matemática e Aplicações) - Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10773/9525>>. Acesso em março de 2017.

HAMACHER, S.; REBELLO, F. R.. "Zoneamento e roteamento de veículos da coleta de correspondência dos Correios usando algoritmos genéticos". ICA, Rio de Janeiro, n. 2, mar/2009.

LAPORTE, G. "Fifty Years of Vehicle Routing". Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). *Transportation Science* - Vol. 43, No. 4, November 2009, pp. 408–416. Maryland, USA.

LIMA, M. P. "Custos logísticos na economia brasileira". Centro de Estudos em Logística - COPPEAD/UFRJ. Rio de Janeiro, 2006.

NOVAES, A.G. *Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição*. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2007.

VALLIM FILHO, A. R. A.; GUALDA, N. D. F.. "Distribution center location: adding value to the supply chain". 2006.

VALLIM FILHO, A. R. A.; MATHIAS, T. N.. "Heurísticas e meta-heurísticas para o problema da roteirização de veículos com janela de tempo". 2009.

VIANA G., V. R. "Meta-heurísticas e programação paralela em otimização combinatória". 248 p. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza: UFC Edições, 1998.

WU, L.. "O problema de roteirização periódica de veículos". 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

Contatos: leopizzi94@gmail.com e arnaldo.aguiar@mackenzie.br