

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

CLEBER EDGAR PESSUTO

Uma Solução Computacional para Otimização do Problema de Roteamento de Veículos com Coletas e Entregas Simultâneas e Janelas de Tempo em uma Transportadora Rodoviária de Cargas

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Dagnino Chiwiacowsky

Bento Gonçalves

2018

Cleber Edgar Pessuto

Uma Solução Computacional para Otimização do Problema de Roteamento de Veículos com Coletas e Entregas Simultâneas e Janelas de Tempo em uma Transportadora Rodoviária de Cargas

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade de Caxias do Sul – UCS

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Dagnino Chiwiacowsky

Bento Gonçalves

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
UCS - BICE - Processamento Técnico

P475s Pessuto, Cleber Edgar, 1979-

Uma solução computacional para otimização do problema de roteamento de veículos com coletas e entregas simultâneas e janelas de tempo em uma transportadora rodoviária de cargas / Cleber Edgar Pessuto. – 2018.

85 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Leonardo Dagnino Chiwiacowsky.

1. Transporte rodoviário de cargas. 2. Software - Desenvolvimento. I. Título. II. Chiwiacowsky, Leonardo Dagnino, orient.

CDU 2. ed.: 656.1.025.4

Índice para o catálogo sistemático:

- | | |
|------------------------------------|-------------|
| 1. Transporte rodoviário de cargas | 656.1.025.4 |
| 2. Software - Desenvolvimento | 004.4 |

Catalogação na fonte elaborada pela bibliotecária
Paula Fernanda Fedatto Leal – CRB 10/2291

Cleber Edgar Pessuto

Uma Solução Computacional para Otimização do Problema de Roteamento de Veículos com Coletas e Entregas Simultâneas e Janelas de Tempo em uma Transportadora Rodoviária de Cargas

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade de Caxias do Sul – UCS

Aprovado em 23 de maio de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Mesquita

Prof. Dr. Guilherme Luís Roehe Vaccaro

Prof. Dr. Odacir Deonísio Graciolli

Bento Gonçalves

2018

AGRADECIMENTOS

Em especial ao meu orientador Prof. Dr. Leonardo Dagnino Chiwiacowsky, pelo empenho no ensino, paciência, respeito, incentivo e comprometimento com desenvolvimento deste projeto.

Ao coordenador Prof. Dr. Gabriel Vidor, pelo incentivo e torcida.

À empresa onde trabalho, pelo apoio e compreensão.

A minha esposa Claudete e minha filha Gabriela pela paciência, carinho, compreensão e companheirismo.

RESUMO

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT), o modal rodoviário representa o meio pelo qual aproximadamente 60% das cargas são transportadas no Brasil, configurando desta forma a maior representatividade entre os modais existentes. No ramo de transporte rodoviário, empresas transportadoras de carga exercem papel decisivo na movimentação de mercadorias em cadeias produtivas de diferentes segmentos da economia. Para atender às exigências de qualidade e excelência operacional, as transportadoras devem planejar suas rotas interligando seus depósitos aos clientes de maneira eficiente e econômica, atendendo à demanda, respeitando a capacidade dos veículos, a sequência de coleta e entrega e as janelas de visitas. O planejamento de rotas é conhecido na literatura como o problema de roteamento de veículos (PRV). Considerado um problema da classe NP-Difícil, não se conhece algoritmo computacionalmente eficiente para sua resolução, especialmente quando avaliadas situações práticas reais. Neste sentido, este trabalho propõe a construção de uma ferramenta (software), denominada de Roteirizador, baseado em um algoritmo metaheurístico híbrido (AH). Formado pela combinação das metaheurísticas Busca Tabu (BT) e Algoritmo Genético (AG), o AH permite combinar as melhores características de ambas as técnicas, fornecendo resultados superiores quando comparados à aplicação de cada técnica individualmente. Deste modo, o Roteirizador, inserido no ambiente computacional de uma transportadora rodoviária de cargas, busca melhorar a eficiência do planejamento de rotas. O AH apresentou em 50% dos experimentos, resultados superiores ou muito próximos dos valores ótimos apresentados pela literatura, e nos experimentos executados em uma unidade da Transportadora, todos os cenários apresentaram ganho em relação ao processo atualmente executado. O Roteirizador, baseado no AH, apresentou a possibilidade de economizar um montante superior a R\$ 500 mil ao ano, unicamente com a redução da distância percorrida pelos veículos. Além do ganho em distância, o correto dimensionamento da jornada de trabalho das tripulações eliminou a necessidade de gastos relacionados ao pagamento de horas extras. Por fim, cabe ainda a possibilidade de um ganho superior tanto em distância quanto no número de veículos empregados caso a Transportadora revise a sua política de agrupamento de clientes por regiões.

Palavras chave: Transportadora Rodoviária. Roteirização. Busca Tabu. Algoritmo Genético. Metaheurística Híbrida. Otimização.

ABSTRACT

According to the National Transport Confederation (CNT), the road transport system represents the means by which approximately 60% of the cargo is transported in Brazil, thus making it more representative of existing modes. In the field of road transport, freight carriers play a decisive role in the movement of goods in productive chains of different segments of the economy. To meet the requirements of quality and operational excellence, such as carriers to plan their routes interconnecting their warehouses to customers of efficient and economical efficiency, meeting the demand, respecting a transport capacity, collection and delivery sequence and windows of visits. Scale planning is called in the literature as the vehicle routing problem (PRV). Considered an NP-Hard class problem, it is not known computationally efficient algorithm for its resolution, especially when evaluating real practical situations. In this sense, this work proposes the construction of a tool (software), called Roteirizador, based on a hybrid metaheuristic algorithm (AH). Formed by the combination of Tabu Search (TB) and Genetic Algorithm metaheuristics (AG), AH allows to combine the best characteristics of both techniques, providing superior results when compared to the application of each technique individually. In this way, the Roteirizador, inserted in the computational environment of a road transport operator of loads, looks for to improve the efficiency of the planning of routes. The AH presented in 50% of the experiments, results superior or very close to the optimal values presented in the literature, and in the experiments performed in an unit of the Carrier, all the scenarios presented a gain in relation to the currently executed process. The Roteirizador, based on the AH, presented the possibility of saving an amount of more than R\$ 500,000 per year, solely by reducing the distance traveled by vehicles. In addition to the distance gain, the correct sizing of crew work hours eliminated the need for expenses related to the payment of overtime. Finally, there is also the possibility of a higher gain both in distance and in the number of vehicles used if Carrier reviews its policy of grouping customers by regions.

Keywords: Road Transportation. Routing. Tabu Search. Genetic Algorithm. Hybrid Metaheuristic. Optimization.

LISTA DE ABREVIATURAS

ABML	Associação Brasileira de Movimentação e Logística
AG	Algoritmos Genéticos
BT	Busca Tabu
CNT	Confederação Nacional do Transporte
FO	Função Objetivo
GRASP	Procedimento Guloso de Busca Adaptativa Randômico
HRH	Metaheurística de alto nível híbrida de retransmissão
HTM	Metaheurística de alto nível híbrida de exploração
LRH	Metaheurística de baixo nível híbrida de retransmissão
LTH	Metaheurística de baixo nível híbrida de exploração
PRV	Problema de Roteamento de Veículos
PRVC	Problema de Roteamento de Veículos Capacitado
PRVCE	Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega
PRVCEJT	Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega e Janela de Tempo
PRVFR	Problema de Roteamento de Veículos com Frete de Regresso
PRVFRJT	Problema de Roteamento de Veículos com Frete de Regresso e Janela de Tempo
PRVJT	Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo
SC	Solução Computacional
TRC	Transportadora Rodoviária de Cargas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Transporte de carga fracionado	14
Figura 2 – Processo de romaneio de carga.....	14
Figura 3 - Algumas variações do PRV	16
Figura 4 - Processo de romaneio de carga com roteirizador	21
Figura 5 – Redução de custos com a roteirização.....	24
Figura 6 - Trabalhos apresentados por entidades sobre o tema	24
Figura 7 – Objetivos e fases do trabalho.....	28
Figura 8 - Exemplo de solução do PRVCEJT	29
Figura 9- Exemplo de representação das posições dos clientes.....	33
Figura 10 - Fluxo do processo da Busca Tabu	35
Figura 11 - Representação da heurística swap intra-route.....	37
Figura 12 - Representação da heurística swap inter-route.....	38
Figura 13 - Representação da heurística 2-opt.....	39
Figura 14 - Representação da heurística Shift Request	39
Figura 15- Representação da heurística Rearrange Request.....	40
Figura 16 - Representação da heurística Two Optimal Insertion (TOI)	40
Figura 17 - Fluxo do processo do Algoritmo Genético	42
Figura 18 - Algoritmo básico do método de seleção por Torneio	44
Figura 19 - Classificação das metaheurísticas híbridas.....	47
Figura 20 - Fluxo do processo do Algoritmo Híbrido	49
Figura 21 - Arquitetura do ambiente computacional da Transportadora	52
Figura 22 - Etapas do processo de experimentação.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características do PRV.....	16
Tabela 2 – Metaheurísticas de busca local aplicadas ao PRV	19
Tabela 3 - Metaheurísticas populacionais aplicadas ao PRV	20
Tabela 4 - Metaheurísticas híbridas aplicadas ao PRV	20
Tabela 5 – Parâmetros empregados no algoritmo de roteirização.....	54
Tabela 6 – Ponderação dos fatores da FO.....	55
Tabela 7 – Lista de autores.....	56
Tabela 8 - Resultados médios da Busca Tabu sem e com intensificação	57
Tabela 9 - Resultados médios da Busca Tabu com intensificação e Algoritmo Híbrido	57
Tabela 10 – Comparativo do melhor valor dos experimentos com o ótimo	58
Tabela 11 - Relação de valores para a quantidade de vizinhos	58
Tabela 12 - Relação de valores para o tamanho da Lista Tabu	59
Tabela 13 - Resultados médios da Busca Tabu sem e com intensificação - 25 clientes.....	59
Tabela 14 - Resultados médios da Busca Tabu sem e com intensificação - 50 clientes.....	60
Tabela 15 - Resultado médio da Busca Tabu sem e com intensificação - 100 clientes.....	60
Tabela 16 - Parâmetros de sintonia da Busca Tabu	61
Tabela 17 - Relação de valores para a taxa de cruzamento.....	61
Tabela 18 - Relação de valores para a taxa de mutação	62
Tabela 19 - Resultados médios do Algoritmo Híbrido - 25 clientes.....	62
Tabela 20 - Resultados médios do Algoritmo Híbrido - 50 clientes.....	62
Tabela 21 - Resultados médios do Algoritmo Híbrido - 100 clientes	63
Tabela 22 - Parâmetros de sintonia da Busca Tabu	63
Tabela 23 - Melhor resultado fornecido pelo Algoritmo Híbrido.....	64
Tabela 24 – Quantidade de eventos por região.....	67
Tabela 25 – Valores dos parâmetros nos experimentos reais.....	67
Tabela 26 – Conjunto de cenários avaliados nos experimentos com casos reais	68
Tabela 27 – Resultados do AH no cenário CD-CJ	68
Tabela 28 - Resultados do AH no cenário CD-SJ	69
Tabela 29 - Resultados do AH no cenário SD-CJ	70
Tabela 30 - Resultados do AH no cenário SD-SJ.....	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA	12
1.2	QUESTÃO DE PESQUISA.....	21
1.3	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	22
1.3.1	Geral	22
1.3.2	Específicos	22
1.4	JUSTIFICATIVA.....	23
1.5	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	25
2	MÉTODO	27
2.1	MÉTODO DE PESQUISA	27
2.2	MÉTODO DE TRABALHO	28
2.2.1	Modelagem	28
2.2.1.1	Modelagem matemática	30
2.2.1.2	Modelo computacional.....	33
2.2.1.2.1	<i>Representação da solução</i>	33
2.2.1.2.2	<i>Busca tabu</i>	34
2.2.1.2.3	<i>Algoritmo Genético</i>	41
2.2.1.2.4	<i>Algoritmo Híbrido</i>	47
2.2.2	Arquitetura computacional	51
3	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	54
3.1	Sintonia dos parâmetros e validação do algoritmo	54
3.1.1	Sintonia dos Parâmetros	58
3.1.2	Validação do Algoritmo	64
3.2	Resultados dos experimentos considerando casos reais	65
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72

1 INTRODUÇÃO

A logística é considerada um dos principais pilares de desenvolvimento econômico de um país, sendo seu desempenho um dos principais fatores para competitividade das empresas, medido pela confiabilidade nas operações que interligam as diferentes empresas que sustentam a cadeia de suprimentos (BANCO MUNDIAL, 2016). Os clientes, denominados embarcadores, na sua grande maioria entendem como desempenho logístico a rapidez e confiabilidade com que seus produtos são disponibilizados pela transportadora (HESKETT, 1994) a seus clientes (clientes finais), e consideram a atividade de transporte de cargas a mais representativa dentro da cadeia de suprimentos, já que em alguns casos pode chegar a dois terços dos custos logísticos (BALLOU, 2006).

Pesquisa apresentada em junho de 2016 pelo Banco Mundial classificou o desempenho logístico de 160 países (LPI – *Logistics Performance Index*), tendo o Brasil alcançado a 55ª posição. O relatório analisou seis componentes: (i) a eficácia da gestão aduaneira no processo de liberação, (ii) qualidade do comércio e das infraestruturas de transporte, (iii) facilidade de organizar remessas com preços competitivos, (iv) competência na qualidade dos serviços logísticos, (v) capacidade de rastrear remessas, e (vi) frequência com que as remessas chegam aos destinatários dentro do prazo de entrega previsto. O relatório destaca a evolução do Brasil na competência logística, rastreabilidade e infraestrutura, por outro lado sinaliza o custo, embarque internacional e pontualidade na entrega como causas para a baixa classificação em relação aos demais países do conjunto avaliado.

O processo de movimentação física de mercadorias entre diferentes pontos é caracterizado pela gestão e operação do transporte de cargas, que segue a matriz modal da região, país ou continente de acordo com definições elaboradas pelos órgãos governamentais competentes (RODRIGUES, 2002). A matriz de transporte é formada por cinco modelos: rodoviário, ferroviário, hidroviário, aeroviário e dutoviário, sendo que a importância de cada modelo pode ser medida pela cobertura da malha, volume transitado, geração de receita e pela natureza de composição do tráfego (BOWERSOX; CLOSS, 2001). O modal dutoviário é eficiente na movimentação de líquidos e gasosos, como petróleo e seus derivados, em grandes quantidades e

distâncias, porém, devido a sua característica, apresenta limitações de transporte em relação a outros modais. O modal aeroviário não apresenta muitas limitações, no entanto, devido ao seu elevado custo de frete em relação a outros modais, é utilizado com maior frequência no transporte de produtos de alto valor agregado, como peças e equipamentos eletrônicos, instrumentos óticos, confecções finas, peças de máquinas e flores. O modal hidroviário caracteriza-se pela sazonalidade e morosidade, tradicionalmente transporta produtos a granel de baixo valor agregado, como minérios, areia, cascalho, grãos, cimento, entre outros (BALLOU, 2006). Com perfil de carga semelhante, o modal ferroviário também é tradicionalmente utilizado para o transporte de produtos a granel, sendo inclusive mais eficiente em termos de consumo de combustível e nos custos operacionais diretos, porém limitado devido aos custos fixos elevados e à baixa flexibilidade de malha (NOVAES, 2007). O modal rodoviário, por sua vez, é considerado mais adequado para curtas distâncias devido ao baixo custo de frete, e permite maior flexibilidade para chegar a qualquer lugar do País, com poucas exceções, porém apresenta menor capacidade de transporte quando comparado aos demais modais.

O transporte de cargas pode ser realizado por meio de um ou mais modais, porém a intermodalidade não é comum no País devido, principalmente, à baixa qualidade da infraestrutura existente e à frágil regulamentação do transporte intermodal que reflete na eficiência dos portos, terminais para integração entre modais e regulamentação da operação de transporte por mais de um modal (VARGAS, 2008). Devido a estas limitações, apesar da capacidade reduzida de transporte de grandes volumes de carga e de apresentar maior custo de frete para longas distâncias, o transporte rodoviário de cargas (TRC) sobrepõe-se em relação aos demais modais, sendo atualmente o modal mais utilizado no País. Principalmente favorecido pelo baixo custo inicial em relação a outros modais (VARGAS, 2008), pela facilidade na aquisição de linhas de financiamento e flexibilidade nas operações que envolvem a atividade do transporte, o TRC representa mais de 61% de toda a movimentação de cargas realizada no País (CNT, 2017), é utilizado com frequência como elemento integrador entre origem e destino e como principal opção de modal para o destino final (SCHLUTER; SCHLUTER, 2005). Ainda, segundo a CNT (2017), o custo do TRC representa cerca de 6% do Produto Interno Bruto (PIB) do País, onde somente no setor de alimentos representa aproximadamente 62,5% da receita líquida.

Devido à representatividade do TRC e à inexistência de um sistema permanente de controle de desempenho, e conseqüente falta de índices que determinem a eficiência do TRC, concomitante a um modelo de gestão tradicional, em grande parte ainda familiar, com modelos arcaicos de gestão empresarial, isenta de procedimentos gerenciais modernos e profissionalizados, justifica-se a realização de estudos mais aprofundados sobre o tema (VARGAS, 2008). Estudo apresentado em setembro de 2010 pelo Instituto de Logística e *Supply Chain* (ILOS), com 61 das principais empresas de transporte rodoviário do País, relacionou como principais desafios das empresas de TRC a restrição de oferta de transporte, pressão para aumento de preços de frete e busca por melhoria da eficiência operacional, sendo este último o maior desafio tendo em vista as limitações para atender, no curto prazo, a necessidade de oferta adicional de transporte e a impossibilidade de repassar integralmente eventuais aumentos de custos de frete para os clientes (ARAÚJO, 2011). Inserido neste contexto que o trabalho em questão se aplica, em uma TRC denominada doravante como Transportadora, que busca a melhoria de sua eficiência operacional, por meio da redução do número de veículo empregados, redução da distância, tempo de viagem e tempo de espera no cliente, e que respeite as restrições de capacidade do veículo, janela de tempo estabelecida pelos clientes, intervalo para almoço e jornada de trabalho, nas atividades relacionadas aos processos de coleta e entrega de mercadorias.

Deste modo, a melhoria de eficiência da Transportadora pode ser obtida no balanceamento adequado da carga, gerenciamento dos despachos e na roteirização dos percursos (rotas), garantindo deste modo a integração dos fretes de distribuição com os fretes de retorno, de modo que os veículos não rodem vazios. De acordo com Novaes (2007), uma TRC difere-se nas operações conforme a modalidade de frete, sendo do tipo carga fechada ou carga fracionada. A carga fechada destina-se à transferência de produtos entre fábrica e centro de distribuição em veículos maiores, permitindo deste modo, o transporte de uma quantidade maior do mesmo produto. Com isso, apesar do custo do veículo ser maior, obtém-se ganhos de escala e conseqüente menor custo por unidade transportada. Por outro lado, a carga fracionada, foco da Transportadora, destina-se às entregas com maior frequência e em pequenas quantidades do mesmo produto, sendo parte por exigência dos clientes, busca por estoques menores ou número elevado de destinos numa delimitada área

geográfica (distribuição urbana de produtos). Ainda, no transporte fracionado, é comum existirem operações intermediárias para consolidação da carga, que elevam o tempo de viagem e o custo do transporte, porém garantem uma frequência maior e um custo menor que a lotação completa.

Para Bowersox e Closs (2001), é preciso conhecer os aspectos econômicos que envolvem a atividade de transporte para poder tomar decisões eficazes, sendo as principais aquelas relativas à manutenção dos veículos, à mão de obra, aos custos administrativos e ao consumo de combustível, sendo este último o aspecto mais representativo em uma empresa de transporte. Além disso, Vargas (2008) destaca a gestão da informação como elemento de grande importância para a eficiência do TRC. O cadastro de clientes, quantidade de produtos a serem entregues a cada cliente, condições para entrega, acondicionamento dos produtos, roteiros de distribuição, entre outras informações, podem ser otimizados por programas de software que auxiliam na preparação dos roteiros de coleta e entrega, roteiro dos veículos, controle dos pedidos, devoluções, monitoramento da frota, entre outros aspectos.

Deste modo, a otimização dos aspectos econômicos depende diretamente da minimização dos custos da operação de transporte (WOODRUFF, 1998), sendo a construção de roteiros de coleta/entrega mais econômicos (roteamento) em relação a tempo e distância um problema de decisão frequente na Transportadora e no TRC como um todo (BALLOU, 2006). A solução deste problema, conhecido na literatura como Problema de Roteamento de Veículos (PRV), busca determinar a melhor sequência de visitas a clientes por um veículo que resulte no menor custo (TARANTILIS; IOANNOU; PRASTACOS, 2005). Nos últimos anos, métodos matemáticos exatos, heurísticos e mais recentemente metaheurísticos foram propostos para resolução do PRV, bem como variantes deste problema, sendo as abordagens de solução baseadas em metaheurísticas consideradas as mais eficientes (BAKER; AYECHER, 2003).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com a Associação Brasileira de Movimentação e Logística (ABML), os custos logísticos nas empresas equivalem, em média, a 19% do seu faturamento

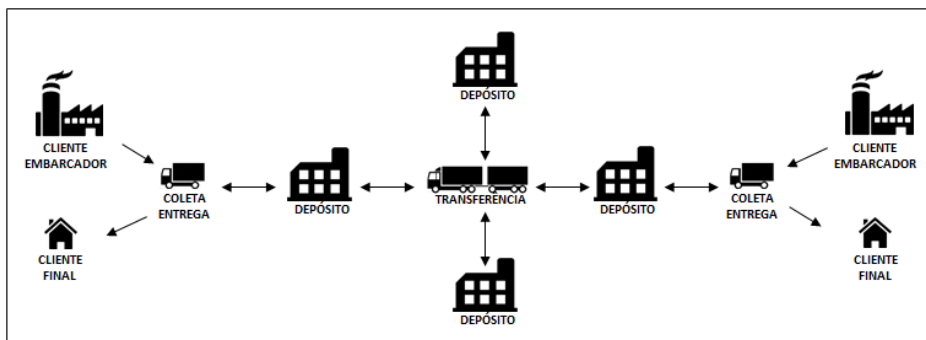
(TERUCHKIN, 2016), tornando a logística um grande desafio aos administradores para manter a competitividade de seus negócios (VALLE, 2016).

Manter a qualidade e maximizar a eficiência nas atividades de consolidação e entrega de carga, com o menor tempo de resposta e garantia de desempenho (BALLOU, 2006), além de maximizar o uso dos recursos, reduzir falhas e atender as obrigações fiscais (VALLE, 2016), representam problemas frequentes de decisão logística. D'Agosto (2016) cita a estruturação do modelo de transporte no Brasil como um desafio gigantesco devido às dimensões continentais do país, considerando como cenário ideal de eficiência a otimização das atividades de planejamento das rotas para que atendam mais clientes em seu percurso, alocação adequada de carga nos veículos e a transferência balanceada entre os diferentes modais. Neste sentido, a implantação de processos e ferramentas de software visam a controlar estes fatores para melhor prever os custos de transporte (MATESCO, 2016).

O modal rodoviário apresenta algumas características que favorecem sua expansão em relação a outros modais como: menor custo inicial de implementação e maior flexibilidade em relação aos outros modais (CAIXETA FILHO; MARTINS, 2000). Para que empresas transportadoras façam o melhor uso deste modal, é necessário priorizar rotas mais curtas, definir o veículo mais adequado, encontrar formas de evitar o trânsito intenso e prezar pelas normas e restrições viárias. Entretanto, quando estes fatores não são contemplados, pode-se observar um aumento na frequência de atrasos e falhas nas operações de coleta e entrega. Neste contexto, o presente estudo aplica-se em uma transportadora rodoviária de cargas, conforme já observado, aqui denominada Transportadora, com foco em carga fracionada e operações intermediárias para consolidação de carga. Na Transportadora, a entrega ocorre em veículos rodoviários de pequeno e médio porte que transportam as mercadorias dos depósitos até o cliente final e, do mesmo modo, ocorre a coleta, transportando as mercadorias do embarcador até os depósitos. No depósito, as mercadorias são separadas (agrupadas) por regiões de entrega de acordo com o destino final da mercadoria, sendo cada região composta por um conjunto de códigos de endereçamento postal (CEP) (CORREIOS, 2018). Algumas regiões são atendidas diretamente pelos veículos do próprio depósito, bem como outras regiões são atendidas por veículos rodoviários de grande porte, denominados veículos de transferência, que transferem as mercadorias para outros depósitos situados

geograficamente mais próximos do destino final da mercadoria, conforme mostrado na Figura 1.

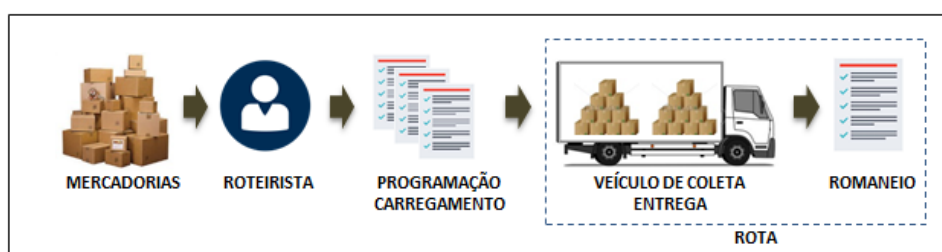
Figura 1 - Transporte de carga fracionado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Concluída a separação por regiões, as mercadorias destinadas a regiões atendidas por outros depósitos são encaminhadas para os veículos de transferência e, ao final, gerados os manifestos de carga. Para as mercadorias de responsabilidade do depósito, inicia-se a montagem da programação de carregamento do dia e consequente carregamento dos veículos, sendo ao final gerado o romaneio de carga por veículo. O romaneio, similar ao manifesto, é um documento que contém a relação de notas fiscais (mercadorias) carregadas no veículo destinadas à entrega, além da relação de coletas a serem feitas no percurso, conforme representado na Figura 2.

Figura 2 – Processo de romaneio de carga



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os veículos partem dos depósitos da Transportadora com seu respectivo romaneio para percorrer uma determinada rota e registram, ao longo do percurso, as coletas e entregas realizadas por meio do uso de um aplicativo (software) instalado em um dispositivo móvel (smartphone). A quantidade de coletas e entregas definidas em cada rota não pode ultrapassar a capacidade do veículo, deve respeitar quando definido pelos clientes o horário de chegada e partida (janela de tempo), intervalo para

almoço da tripulação e o seu horário de jornada. O atendimento dessas condições depende diretamente da habilidade e conhecimento do roteirista, profissional este encarregado pelo sequenciamento (ordenação) das coletas e entregas (eventos) ao longo da rota, resultando, de acordo com a empresa, em um processo oneroso e empírico.

Trabalhos associados à gestão de rotas (roteirização) destacam o Problema de Roteamento de Veículos (PRV) em inúmeras áreas (MESTER; BRÄYSY, 2005). Problemas relacionados à (i) programação de ônibus escolares, (ii) cavalos mecânicos e carretas, (iii) coletas de resíduos domiciliares, (iv) serviço de transporte de pessoas porta a porta (*dial-a-ride*), entre outras áreas, sendo todos estes exemplos de aplicação do PRV (CUNHA, 2000). De acordo com Toth e Vigo (2002), o PRV fundamenta-se basicamente em quatro componentes: malha de transporte, clientes, veículos e motoristas. A malha de transporte pode ser representada por meio de um grafo, sendo os caminhos identificados pelas arestas e os clientes e depósito pelos vértices. Os veículos normalmente compõem uma frota que pode ser homogênea, quando os veículos possuem a mesma capacidade de carga, ou heterogênea, quando possuem diferentes capacidades de transporte. Os veículos são utilizados para carga e descarga (coleta e entrega) em um ou vários depósitos, normalmente partindo e retornando ao mesmo depósito, como é o caso da Transportadora, mas também podem partir de um depósito e retornar para outro depósito. Conduzindo os veículos, os motoristas devem atender diversas restrições determinadas pela Transportadora e pela legislação trabalhista como, por exemplo, o tempo máximo de trabalho, intervalo de almoço, tempo máximo para execução das operações de coleta e entrega, horas extras, entre outros.

Comumente no TRC, os clientes são divididos em grupos, sendo cada grupo atendido por um depósito e uma frota de veículos de capacidade homogênea, limitada, que parte e retorna do mesmo depósito, caracterizando neste cenário a versão clássica do PRV, também denominado na literatura como Problema de Roteamento de Veículos Capacitado (PRVC) (TOTH; VIGO, 2002 e IORI *et al.*, 2007). Estes mesmos autores afirmam que o PRV pertence à classe de complexidade NP-difícil e tem como objetivo principal minimizar o custo total para atender todos os clientes.

O PRV apresenta variações de acordo com algumas características e restrições, conforme apresentado na Tabela 1.

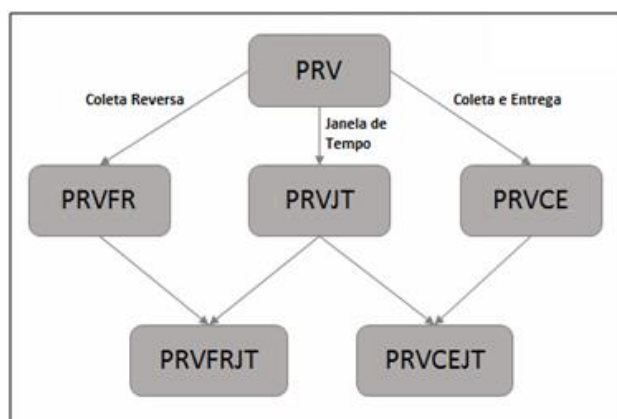
Tabela 1- Características do PRV

Características	Possíveis Opções
Tamanho da frota disponível	Um veículo e múltiplos veículos.
Tipo de frota disponível	Homogênea e heterogênea.
Domicílio dos Veículos	Único depósito e múltiplos depósitos.
Natureza das demandas	Estocástica e determinística.
Localização das demandas	Nos nodos e nos arcos.
Tipo de rede	Não-direcionada, direcionada e euclidiana.
Restrições quanto à capacidade dos veículos	Capacidades iguais, diferentes e sem capacidade.
Tempo Máximo de duração da rota	O mesmo tempo para todas as rotas, diferentes para rotas diferentes e tempo não definido.
Operação	Entrega, coleta e ambos.
Custos	Variáveis por rota e fixos.
Objetivos	Minimizar custo total das rotas, minimizar a soma dos custos fixos e variáveis e minimizar número de veículos requeridos.

Fonte: Bodin, Golden e Assad (1983)

Baseado nas características e opções apresentadas na Tabela 1, Toth e Vigo (2002) apresentam algumas variações do PRV, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Algumas variações do PRV



Fonte: Toth e Vigo (2002)

A partir do Problema de Roteamento de Veículos, a Figura 3 apresenta dois níveis de variação. No primeiro, o Problema de Roteamento de Veículos com Frete de Regresso (PRVFR), também conhecido no mercado como Coleta Reversa, considera o retorno da mercadoria do cliente até o depósito, o Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo (PRVJT), onde é considerado o intervalo de tempo baseado no horário de chegada e partida determinado pelo cliente, e o Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega (PRVCE), onde é considerada a execução de ambas as atividades pelo mesmo veículo e rota. No segundo nível, o Problema de Roteamento de Veículos com Frete de Regresso e Janela de Tempo (PRVFRJT) representa o mix do retorno da mercadoria do cliente para o depósito, respeitando um determinado horário de chegada e partida definido pelo cliente, e o Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega e Janela de Tempo (PRVCEJT), que representa o mix da atividade de coleta e entrega simultânea, respeitando um determinado horário de chegada e partida definido pelo cliente. O PRVCEJT, derivado da junção das características do PRVJT e PRVCE representa a realidade de operação da Transportadora e, conseqüentemente, será abordado neste trabalho.

Nos últimos anos, métodos matemáticos exatos, heurísticos e mais recentemente metaheurísticos foram propostos para resolução do PRV, bem como das variantes deste problema (LAPORTE, 2009). Os métodos exatos podem ser divididos em três grupos: métodos de árvore de busca direta, programação dinâmica e programação linear inteira (LAPORTE; NORBERT, 1980 e TOTH; VIGO, 2002), sendo indicada sua aplicação por diversos autores em problemas com poucas centenas de clientes devido a sua ineficiência pelo alto custo computacional exigido na execução (ARCHETTI *et al.*, 2007; CORDEAU *et al.*, 2002; IORI *et al.*, 2007; LAPORTE, 1992a; LAPORTE, 2009; REGO; ROUCAIROL, 1996; TARANTILIS; IOANNOU; PRASTACOS, 2005; XU; KELLY, 1996). Laporte (2009) sugere a aplicação dos métodos exatos em problemas com até 50 clientes, deste modo, a resolução do PRV baseia-se na maior parte dos casos em métodos heurísticos (LAPORTE *et al.*, 2000 e TOTH; VIGO, 2002). Para maiores detalhes sobre os métodos exatos para resolução do PRV, sugere-se a leitura dos *survey's* elaborados por Laporte e Nobert (1980) e Laporte (1992a), onde são apresentados diversos

exemplos baseados em algoritmos de *branch-and-bound*, relaxações diversas, programação dinâmica e algoritmos para formulações de fluxo de veículos.

Embora técnicas exatas resolvam o PRV de maneira satisfatória, uma vez que este é classificado como NP-difícil, não se conhece algoritmo computacionalmente eficiente para sua resolução, e sua solução de forma manual ou sem utilização de métodos e ferramentas adequadas apresenta uma baixa eficiência, especialmente quando avaliados problemas de dimensão real (*large-size*), como é o caso deste trabalho. Neste caso, recomenda-se o uso de técnicas heurísticas e metaheurísticas (BRÄYSY e GENDREAU, 2005; LAPORTE, 2009), por conta do alto tempo computacional despendido pelas técnicas exatas para resolução do problema. Os métodos heurísticos podem ser classificados em dois grupos: heurísticas clássicas e metaheurísticas (LAPORTE *et al.*, 2000). As heurísticas clássicas para resolução do PRV são divididas em métodos construtivos, métodos de duas fases e métodos de melhoramento (BREEDAM, 1995; GENDREAU; HERTZ; LAPORTE, 1994; REGO, 1998). As heurísticas construtivas desenvolvem uma solução viável gradualmente no processo de construção da solução, sendo os algoritmos de Clarke e Wright (1964) e Mole e Jamenson (1976) exemplos de métodos construtivos. As heurísticas de duas fases separam o problema em duas etapas: agrupamento dos vértices em rotas viáveis e construção das rotas. Estas etapas podem ser executadas na seguinte ordem: primeiro agrupar e posteriormente criar rotas viáveis para cada grupo ou, de forma inversa, primeiro criar uma rota para todos os vértices e posteriormente separar em grupos de rotas viáveis. As heurísticas de Gillet e Miller (1974) e Fisher e Jaikumar (1981) são exemplos de soluções baseadas na heurística de duas fases. As heurísticas de melhoramento, também chamadas de técnicas de busca local (LAPORTE, 2009; MARINAKIS; MIGDALAS, 2002; THANGIAH; PETROVIC, 1997), constituem um conjunto de técnicas baseadas no conceito de vizinhança, com o objetivo de gerar novos vizinhos a partir da modificação da solução existente.

Dentre as técnicas heurísticas, destacam-se as metaheurísticas em virtude do seu caráter geral de aplicação. As metaheurísticas caracterizam-se pelo método de solução que conduz uma técnica de melhoramento local em conjunto com estratégias de alto nível, com o objetivo de escapar de ótimos locais e assim ampliar a busca no espaço de soluções (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003). As metaheurísticas

podem ser baseadas em busca local, também conhecida na literatura como busca em trajetória, e em busca populacional (GENDREAU e POTVIN, 2010). As metaheurísticas baseadas em busca local, de acordo com Laporte (2009), partem de uma solução inicial viável para então efetuarem a exploração do espaço de soluções. Por meio de um processo de busca em vizinhança, a cada iteração, realiza-se o movimento para outra solução encontrada na vizinhança da solução atual. A Tabela 2 apresenta alguns exemplos de aplicação desta classe de metaheurística ao PRV.

Tabela 2 – Metaheurísticas de busca local aplicadas ao PRV

Metaheurística	Autor
Busca Tabu	Brandão (2011) Cordeau e Maischberger (2012) Jin; Crainic; Lokketangen (2012) Li; Leung; Tian (2012) Nguyen; Crainic; Toulouse (2013) Tarantilis; Stavropoulou; Repoussis (2012)
Recozimento Simulado	Baños <i>et al.</i> (2013) Kuo (2010) Lin; Yu; Chou (2009) Wang <i>et al.</i> (2015)
GRASP	Marinakis (2012) Prins (2009) Villegas <i>et al.</i> (2011)
Busca Local Iterada	Cattaruzza <i>et al.</i> (2014) Li <i>et al.</i> (2015) Michallet <i>et al.</i> (2014)
Busca em Vizinhança Variável	Derigs; Pullmann; Vogel (2013) Hong (2012)
Busca em Vizinhança Muito Variável	Sébastien <i>et al.</i> (2015) Edmund; Graham (2014)

Fonte: Elaborado pelo autor

Por sua vez, a busca populacional explora um conjunto de soluções simultâneas, a procura das melhores para formar uma nova população. Pode-se destacar alguns exemplos de aplicação desta classe de metaheurística ao PRV, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Metaheurísticas populacionais aplicadas ao PRV

Metaheurística	Autor
Algoritmo Genético	Anbuudayasankar <i>et al.</i> (2012) Cheng e Wang (2009) Ghoseiri e Ghannadpour (2010) Liu; Huang; Ma (2009) Lu e Yu (2012) Nazif e Lee (2012) Tasan e Gen (2012);
Otimização por Colônia de Formigas	Yu e Yang (2011) Yu; Yang; Xie (2011) Yu; Yang; Yao (2009)
Otimização por Enxame de Partículas	Ai e Kachitvichyanukul (2009a) Ai e Kachitvichyanukul (2009b) Goksal; Karaoglan; Altiparmak (2013) Marinakis; Iordanidou; Marinaki (2013) Marinakis e Marinaki (2010)

Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo Cordeau e colaboradores (2002), a Busca Tabu (BT) é a metaheurística mais indicada para solução do PRV quando comparada a outros métodos. Entretanto, a BT apresenta dificuldades no mecanismo de diversificação por ser uma técnica de busca em trajetória, enquanto o Algoritmo Genético (AG) possui características de busca populacional que poderiam suprir esta deficiência da BT (TALBI, 2009). Neste sentido, as técnicas metaheurísticas podem ser aplicadas individualmente ou de forma combinada, com o objetivo de uma técnica suprir as deficiências da outra. Na forma combinada, compõem uma abordagem híbrida para solução de problemas de otimização, combinando de maneira adequada as melhores características de cada uma das técnicas (GENDREAU e POTVIN, 2010). A literatura mostra que os algoritmos híbridos têm fornecido soluções de melhor qualidade para problemas de otimização clássicos e da vida real (TALBI, 2002; TALBI, 2009). A Tabela 4 apresenta alguns exemplos de aplicação desta abordagem ao PRV.

Tabela 4 - Metaheurísticas híbridas aplicadas ao PRV

Metaheurística	Autor
Busca em Vizinhança Variável e Busca Tabu	Belhaiza; Hansen; Laporte (2014)

Otimização por Enxame de Partículas e Algoritmo Genético	Kuo; Zulvia; Suryadi (2012)
Algoritmo Genético com heurísticas de duas fases	Wang e Lu (2009)
Algoritmo Genético com estratégias de intensificação	Vidal <i>et al.</i> (2012)

Fonte: Elaborado pelo autor

Desta forma, este trabalho propõe o emprego de uma abordagem híbrida composta pelas metaheurísticas Busca Tabu (BT) e Algoritmo Genético (AG) para solução do Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega e Janela de Tempo (PRVCEJT) na Transportadora. Estas técnicas metaheurísticas serão implementadas por meio de um software, denominado de Roteirizador, no processo de romaneio de carga, auxiliando o roteirista na gestão de rotas (roteirização), conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Processo de romaneio de carga com roteirizador



Fonte: Elaborado pelo autor.

1.2 QUESTÃO DE PESQUISA

O presente estudo aplica-se em uma transportadora rodoviária de cargas, denominada como Transportadora por questões de sigilo. De porte médio, possui 40 anos de mercado, está sediada na Serra Gaúcha no estado do Rio Grande do Sul, é especializada em transporte de carga fracionada, contemplando as atividades de coleta, transferência e entrega. Atualmente, conta com cerca de três mil colaboradores diretos e indiretos, atuando em 66 unidades de negócio espalhadas nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais e uma unidade

na Argentina. Presentemente, movimenta 96 mil volumes por dia e possui uma frota de 850 veículos, sendo que parte da frota é própria e parte é terceirizada.

Baseado no que foi descrito até o momento, pode ser enunciada a seguinte questão de pesquisa:

Quais as características e como elas devem ser utilizadas para gerar uma solução computacional (software) que organize simultaneamente os eventos relacionados à coleta e entrega, de modo que otimize a eficiência operacional e respeite as restrições no contexto da Transportadora?

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

A presente pesquisa possui os objetivos a seguir definidos.

1.3.1 Geral

Desenvolver um software de roteirização baseado em uma abordagem metaheurística híbrida, inserido no processo de romaneio de carga (Figura 4) da Transportadora e que contribua com a redução dos custos operacionais e melhora do nível de qualidade dos serviços logísticos no contexto da empresa.

1.3.2 Específicos

Nesta pesquisa, os objetivos específicos compreendem:

- a. Analisar estudos recentes sobre o PRV baseado em abordagens metaheurísticas híbridas;
- b. Definir o modelo híbrido mais adequado para representação do PRVCEJT;
- c. Desenvolver um software de roteirização baseado no modelo escolhido, devidamente validado, avaliado e integrado;
- d. Apresentar e analisar a contribuição do software de roteirização ao processo no qual foi inserido.

1.4 JUSTIFICATIVA

A cadeia de suprimentos compreende a movimentação e estocagem de bens, sendo a movimentação da fábrica ou centro de distribuição até o cliente final a atividade de maior custo (CHRISTOFIDES, 1981). Segundo Ballou (2006), o transporte representa até dois terços dos custos logísticos, deste modo, devido a sua representatividade, é preciso garantir a disponibilidade de coleta e entrega dos bens de acordo com os níveis acordados, mantendo um baixo custo operacional e mitigando os excessos e desperdícios (COSTA, 2015).

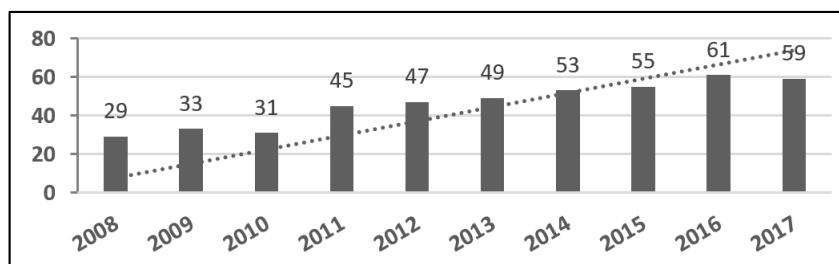
Neste contexto, a roteirização busca determinar a melhor sequência de visitas a serem realizadas pelos veículos, pois viabiliza, através da análise de indicadores de desempenho, a mensuração das atividades de distribuição, podendo reduzir, deste modo, de 10% a 25% os custos totais de operação (ARAÚJO, 2003; MELO; FERREIRA FILHO, 2001).

Pesquisando pelo termo “redução de custos com a roteirização” no Google Acadêmico (2018), encontrou-se 487 apontamentos no período de 2008 a 2017 e, introduzindo os seguintes critérios de filtragem: (a) identificar a instituição ou empresa de origem do trabalho, (b) eliminar trabalhos que efetuaram apenas citações ou apontamentos sobre o tema; restaram 462 registros. Para a realização da pesquisa, utilizou-se o software *Publish or Perish*¹ e nos filtros *All of the words* e *The phase* a palavra “roteirização” e a frase “redução de custos” respectivamente.

Com os dados filtrados, foi construído um gráfico da evolução temporal dos trabalhos. Representado na Figura 5, o gráfico permite observar um crescimento médio de 10% ao ano no período, além de apresentar um expressivo crescimento linear no número de pesquisas sobre o tema.

¹ Publish or Perish V.6 é um software livre que recupera e analisa citações acadêmicas. Disponível em <http://www.harzing.com/resources/publish-or-perish/>

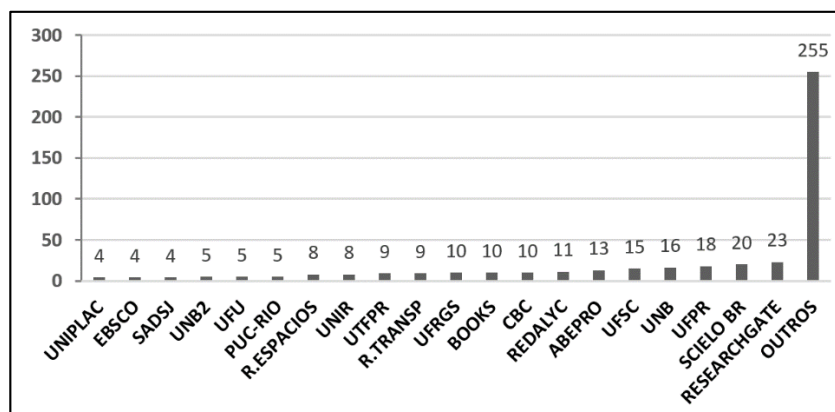
Figura 5 – Redução de custos com a roteirização



Fonte: Google Acadêmico em 28/04/2018

Ainda neste contexto, na Figura 6 observam-se as 20 entidades que mais apresentaram trabalhos, representando 45% do total dos trabalhos no período, complementarmente observa-se o interesse pelo tema em diferentes instituições.

Figura 6 - Trabalhos apresentados por entidades sobre o tema



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os estudos relacionados na pesquisa, Arruda Júnior (2014) recomenda a inclusão do cálculo de eficiência da rota percorrida pelos veículos além da distância da rota na solução de roteirização para otimizar os custos de transporte. Lima *et al.* (2015) citam a roteirização como a etapa mais importante na implementação de rotas, pois é neste momento que se define o percurso, o tipo de veículo e os clientes/fornecedores visitados com o objetivo de melhor aproveitar a capacidade dos veículos. Costa (2015) apresenta como resultado de uma pesquisa (estudo de caso) que a roteirização adequada de entregas permite às empresas reduzir os gastos com combustível, além de maior controle de rotas e redução das distâncias percorridas pelos veículos. Coelho *et al.* (2015) destacam que a criação de itinerários por meio da roteirização possibilita atender diversos locais na mesma viagem do veículo e obter, desta forma, maior aproveitamento da capacidade do veículo devido à consolidação

de carga, reduzindo deste modo o número de viagens e conseqüentemente os custos da atividade.

Com a introdução do software de roteirização no processo de romaneio de carga (Figura 4), a Transportadora espera alcançar maior eficiência no processo realizado atualmente de forma manual pelo roteirista. O Roteirizador disponibiliza sugestões de rotas que minimizem a distância e o tempo de viagem e respeite as restrições de capacidade, janela de tempo, intervalo de almoço e jornada de trabalho, resultando no melhor aproveitamento da capacidade da frota e número de veículos disponibilizados para a operação, além de reduzir o tempo de espera dos veículos para realização dos eventos programados. A possibilidade de avaliar a seqüência (ordenação) de realização dos eventos de coleta e entrega pelo motorista do veículo é outro ponto considerado como um ganho, pois nem sempre o motorista segue a seqüência definida pelo roteirista devido a não refletir em muitos casos a melhor maneira para percorrer a rota. Neste sentido, o Roteirizador traz mais segurança na tomada de decisões do roteirista e passa maior confiabilidade ao motorista porque o software baseia-se em cartografia atualizada, podendo inclusive considerar, futuramente, a medida do tempo de viagem e a intensidade do trânsito no determinado horário de realização da visita.

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

A estrutura adotada para a este documento difere da estrutura tradicionalmente utilizada em trabalhos acadêmicos, estando alinhada com aquela de um relatório científico de caráter profissional. Na estrutura adotada, os fundamentos teóricos que embasam a pesquisa são apresentados à medida que se faz necessário o entendimento dos conceitos utilizados em cada etapa do trabalho, não existindo, portanto, um capítulo específico de fundamentação teórica.

Desta forma, este documento está organizado em quatro capítulos. O Capítulo 1 consiste na introdução, onde é apresentada a contextualização da pesquisa, questão de pesquisa, objetivos do trabalho e a justificativa do estudo. O Capítulo 2 aborda o método de pesquisa e o método de trabalho, detalhando a modelagem matemática, o modelo e a arquitetura computacional. No Capítulo 3, encontram-se

descritos os experimentos que foram realizados no desenvolvimento da pesquisa e os respectivos resultados. Por fim, no Capítulo 4, são apresentadas as considerações finais.

2 MÉTODO

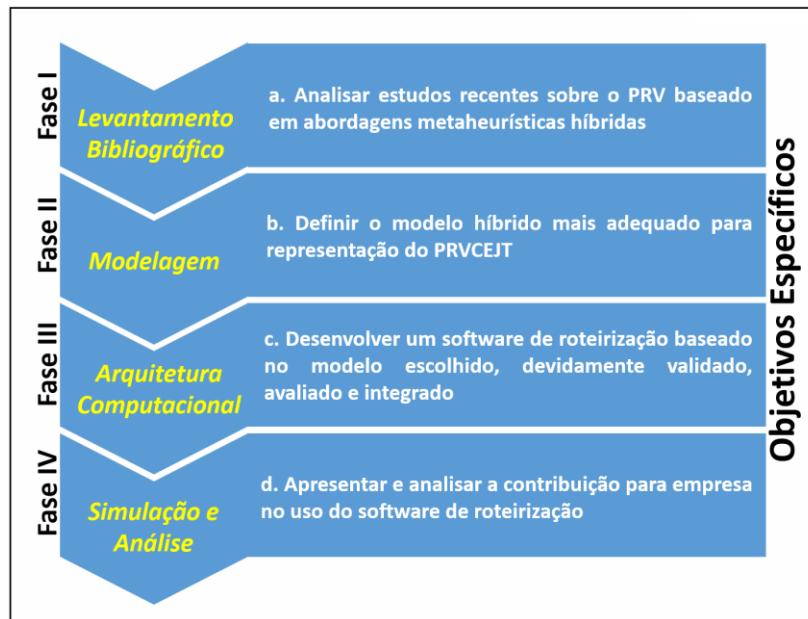
Este capítulo apresenta uma visão geral sobre os procedimentos metodológicos adotados para resolução do PRVCEJT, com detalhamento sobre o método de pesquisa adotado e sobre o método de trabalho, com descrição do modelo matemático adotado e do modelo computacional desenvolvido.

2.1 MÉTODO DE PESQUISA

Pode-se definir uma pesquisa como um processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico em busca de respostas aos problemas por meio de procedimentos científicos (GIL, 2008). Segundo Mattar (1999), as pesquisas podem ser classificadas por inúmeros critérios, como seu escopo, natureza, objetivos e características específicas. Neste sentido, para entender o método adotado, a pesquisa classifica-se como um estudo de modelagem e simulação, de natureza quantitativa, e quanto aos objetivos e características do tipo causal.

A fim de atingir os objetivos elencados no Capítulo 1, a pesquisa divide-se em quatro fases. A Fase I, apresentada na Seção 1.1, discute métodos para resolução do Problema de Roteamento de Veículos com ênfase em técnicas metaheurísticas e estudos sobre metaheurísticas híbridas. Na Seção 2.2, apresenta-se a Fase II, onde é apresentado o modelo metaheurístico híbrido desenvolvido, baseado na combinação das melhores características de duas diferentes metaheurísticas e fundamentado no modelo matemático, para solução do PRVCEJT. Ainda nesta seção, apresenta-se a Fase III, a arquitetura computacional, onde se descreve a ferramenta de solução proposta, inserida no ambiente computacional da Transportadora. Na Fase IV, são apresentados os resultados das simulações realizadas com a ferramenta de solução computacional em instâncias de teste, bem como os testes em ambiente real da empresa. A Figura 7 apresenta as fases do trabalho e os respectivos objetivos específicos.

Figura 7 – Objetivos e fases do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor.

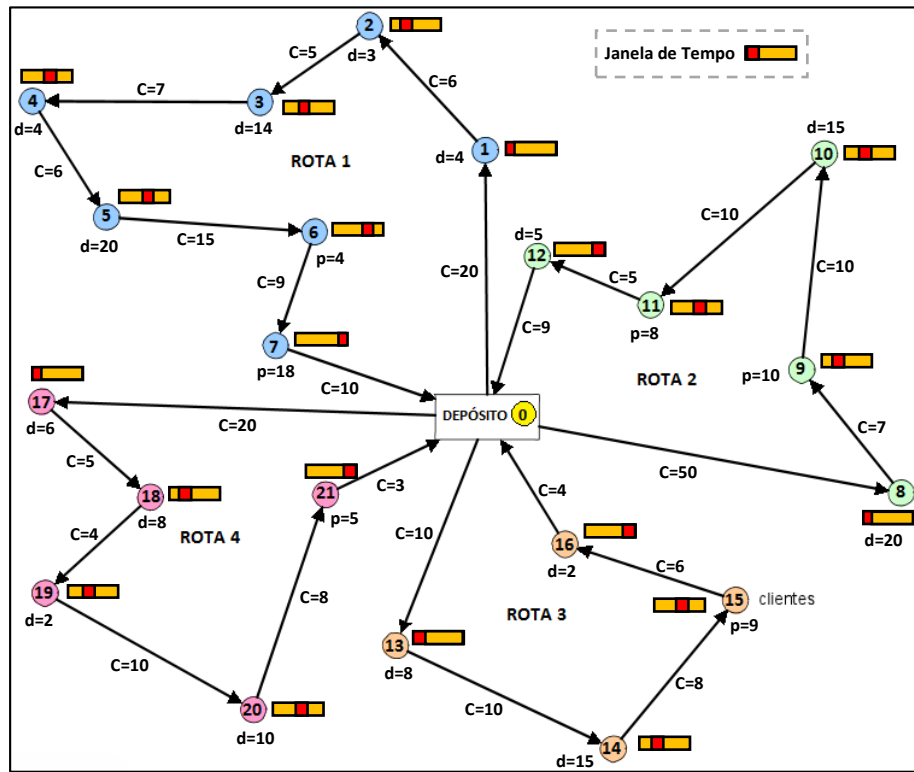
2.2 MÉTODO DE TRABALHO

Esta seção apresenta todo o detalhamento do método de trabalho adotado para a realização da pesquisa.

2.2.1 Modelagem

Conforme apresentado na Seção 1.1, o Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega e Janela de Tempo (PRVCEJT) busca encontrar o menor percurso (circuito) simples R das arestas que passe por todos os vértices de G (circuito hamiltoniano) formados por um grafo completo $G = (V, A)$, onde $V = \{0, \dots, n\}$ é o conjunto de vértices, que representam os clientes, e A é o conjunto de arestas, que representam as ligações entre os clientes (LAPORTE, 1992; RALPH *et al.*, 2001; TARANTILIS *et al.*, 2005; THANGIAH; PETROVIC, 1997; TOTH; VIGO, 2002). A Figura 8 apresenta um exemplo de solução para o PRVCEJT.

Figura 8 - Exemplo de solução do PRVCEJT



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 8, o depósito está no centro, representado pelo vértice V_0 , e os clientes representados pelos vértices V_i onde, neste exemplo, $i = 1, \dots, n = 21$, distribuídos em quatro rotas, sendo a primeira rota interligando o depósito aos clientes 1 a 7, a segunda rota interligando o depósito aos clientes 8 a 12, a terceira rota interligando o depósito aos clientes 13 a 16 e a quarta rota interligando o depósito aos clientes 17 a 21. Cada aresta $(i, j) \in A$ contém associado um custo $c_{ij} > 0$, representando o custo de viagem do vértice i até o vértice j , não sendo permitidas arestas do tipo (i, i) . Por ser um grafo orientado, a matriz de custos é assimétrica, isto é $c_{ij} \neq c_{ji}$, caso contrário a matriz é simétrica. Pressupõe-se que o grafo seja conexo, permitindo que o conjunto de vértices V_i seja conectado por um conjunto de arestas orientadas $(i, j) \in A$ satisfazendo deste modo a desigualdade triangular $c_{ik} + c_{kj} \geq c_{ij}$, para todo $i, j, k \in V$. Com isso, quando a soma dos custos de cada arco do grafo igualar ao custo do menor caminho entre origem e destino, o desvio correspondente satisfará a desigualdade triangular. Essa desigualdade é essencial para o PRVCEJT. Adicionalmente, cada cliente representado por V_i possui uma demanda de entrega $d_i = -q_i$, que pertence ao conjunto de entregas D e uma demanda de coleta $p_i = q_i$,

que pertence ao conjunto de coletas P , onde $i = 1, \dots, n = 21$, e $d_i > 0$, $p_i \geq 0$, exceto para o depósito onde $d_0 = d_{n+1} = 0$, pois representa o ponto de partida e chegada dos veículos, de modo que o conjunto de coletas e entregas seja representado por $N = D \cup P \cup \{d_0, d_{n+1}\}$. Um intervalo de tempo $[a_i, b_i]$, também chamado de janela de tempo, exige que um veículo k visite o cliente i dentro de um intervalo de tempo pré-determinado (ROPKE; CORDEAU, 2009; TOTH; VIGO, 2002), sendo a_i e b_i os instantes de tempo inicial e final, respectivamente. Emprega-se uma frota homogênea de K veículos, com capacidade individual $Q_k = Q$ de modo que $d_i, p_i \leq Q$ e $\sum d_i, p_i \leq K$ para garantir o atendimento a todos os clientes, respeitando a restrição máxima de um veículo por rota. No momento que os veículos deixam o depósito, para cada cliente i é associado o tempo de serviço s_i , para cada aresta $(i, j) \in A$ é associado um tempo de viagem t_{ij} de modo que cada circuito simples R (i) inicie e finalize no vértice do depósito V_0 , (ii) cada cliente V_i faça parte de um único circuito, (iii) a soma das demandas $\{d_i, p_i\}$ não exceda a capacidade Q do veículo k , (iv) para cada cliente i , o veículo permanece no local pelo instante de tempo s_i respeitando a janela de tempo $[a_i, b_i]$ e (v) para cada cliente i associado às demandas $\{d_i, p_i\}$, com o vértice de origem $O_i \neq V_0$, o vértice de destino D_i deve ser atendido no mesmo circuito simples R , posterior ao vértice de origem O_i .

2.2.1.1 Modelagem matemática

Cordeau (2006) apresenta uma formulação matemática constituída pelos índices k, i, j representando veículo, cliente origem e cliente destino, respectivamente. Define-se x_{ij}^k como variável de decisão do PRVCEJT, sendo que, para cada arco $(i, j) \in A$ e veículo $k \in K$, $x_{ij}^k = 1$ se e somente se o veículo k viaja do cliente i para o cliente j , caso contrário $x_{ij}^k = 0$, para cada cliente $i, j \in N$ e cada veículo $k \in K$, sendo T_i^k o instante de tempo de início de serviço do veículo k no cliente i e Q_i^k a carga do veículo k após a visita ao cliente i . Assim, a seguir são apresentados de forma conjunta todos os elementos utilizados no modelo matemático:

- i : cliente que recebe a visita de um veículo k ;
- j : cliente seguinte a i que recebe a visita de um veículo k ;

- c_{ij} : custo de viagem do cliente i até o cliente j ;
- k : veículo que visita os clientes i, j ;
- q_i : demanda genérica no cliente i ;
- d_i : demanda de entrega no cliente i ;
- p_i : demanda de coleta no cliente i ;
- N : conjunto de coletas e entregas;
- D : conjunto de coletas;
- P : conjunto de entregas;
- a_i : instante de abertura da janela de tempo no cliente i ;
- b_i : instante de fechamento da janela de tempo no cliente i ;
- K : conjunto de veículos (frota);
- Q_k : capacidade do veículo k ;
- Q : capacidade da frota;
- t_{ij} : tempo de viagem do cliente i até o cliente j ;
- s_i : tempo de serviço no cliente i ;
- x_{ij}^k : variável de decisão;
- T_i^k : instante de tempo de início de serviço do veículo k no cliente i ;
- Q_i^k : carga do veículo k após a visita ao cliente i ;
- T_0^k : horário de partida do depósito do veículo k ;
- T_{n+1}^k : horário de retorno do veículo k para o depósito;
- T_k : tempo de jornada do veículo k .

Desta forma, representa-se o modelo matemático como:

$$\min FO = \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (1)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ij}^k = 1, \quad i \in P \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij}^k - \sum_{j \in N} x_{lj}^k = 0, \quad i \in P, l \in D, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0,j}^k = 1, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ji}^k - \sum_{j \in N} x_{ij}^k = 0, \quad i \in P \cup D, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,n+1}^k = 1, k \in K \quad (6)$$

$$T_j^k \geq (T_i^k + s_i + t_{ij})x_{ij}^k, \quad i \in N, j \in N, k \in K \quad (7)$$

$$Q_j^k \geq (Q_i^k + q_j)x_{ij}^k, \quad i \in N, j \in N, k \in K \quad (8)$$

$$T_{n+1}^k - T_0^k \leq T_k, \quad k \in K \quad (9)$$

$$a_i \leq T_i^k \leq b_i, \quad i \in N, k \in K \quad (10)$$

$$\max\{0, q_i\} \leq Q_i^k \leq \min\{Q_k, Q_k + q_i\}, \quad i \in N, k \in K \quad (11)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \quad i \in N, j \in N, k \in K \quad (12)$$

A função objetivo (1) minimiza o custo total da rota. As restrições (2) e (3) garantem que cada visita seja realizada exatamente uma vez e que os clientes de coleta e entrega associados serão visitados pelo mesmo veículo. As restrições (4), (5) e (6) garantem que a rota de cada veículo k inicia no depósito de origem e termina no depósito de destino e as restrições (7) e (8) garantem as condições de janela de tempo e capacidade de carga, quando o veículo k utilize o arco (i, j) para $x_{ij}^k = 1$. Assim, na restrição (7), o instante de tempo em que o veículo k inicia o serviço no cliente j deve ser maior que o instante de tempo em que iniciou o serviço no nó i , acrescido do período de tempo necessário à realização desse serviço e do período de tempo de viagem entre o cliente i e o cliente j . Do mesmo modo, na restrição (8), a capacidade de carga após o veículo k deixar o cliente j deve ser maior que a capacidade de carga com a qual deixou o cliente i , acrescido da carga própria do cliente j . A restrição (9) garante a duração de cada rota de cada veículo k , (10) garante a janela de tempo e (11) a capacidade de carga, entendida como capacidade de peso.

Para a implementação computacional da solução, foi adotada uma versão modificada do modelo definido pelas equações (1) – (12). As restrições representadas pelas equações (10) e (11) foram relaxadas e inseridos os termos correspondentes na função objetivo (1) na forma de penalizações, ponderados pelos fatores de penalização da distância total (P_{DT}), da chegada após o fechamento da janela (P_j) e da violação da capacidade do veículo (P_Q). Desta forma, a nova expressão da função objetivo a ser empregada no processo de otimização é dada por:

$$\begin{aligned} \min FO = & P_{DT} \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij}^k x_{ij}^k + P_J \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} \max\{0, (T_j^k - b_j)\} + \\ & + P_Q \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} (Q_i^k - \min\{Q_k, Q_k + q_i\}) + P_{NV} \sum_{k \in K} 1 \end{aligned} \quad (13)$$

Além dos termos de penalização correspondentes às restrições relaxadas, também foi inserido um termo de penalização relacionado ao número de veículos empregados, ponderado pelo parâmetro P_{NV} . Este termo foi inserido na FO a fim de permitir minimizar, também, a quantidade de veículos utilizados em uma região.

2.2.1.2 Modelo computacional

Propõe-se neste estudo utilizar uma metaheurística híbrida que combine as características da BT e do AG. Nas próximas seções, serão apresentados os detalhes de cada uma das técnicas empregadas neste estudo.

2.2.1.2.1 Representação da solução

A solução será representada por uma sequência de clientes, onde a primeira posição corresponde ao depósito e as demais posições representam os clientes na ordem que serão visitados pelo veículo. A posição final de cada rota é armazenada em uma estrutura auxiliar, conforme representado na Figura 9.

Figura 9- Exemplo de representação das posições dos clientes

Posição	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cliente	0	6	1	9	2	4	7	5	8	3
Rota	3	6								

Fonte: Elaborado pelo autor.

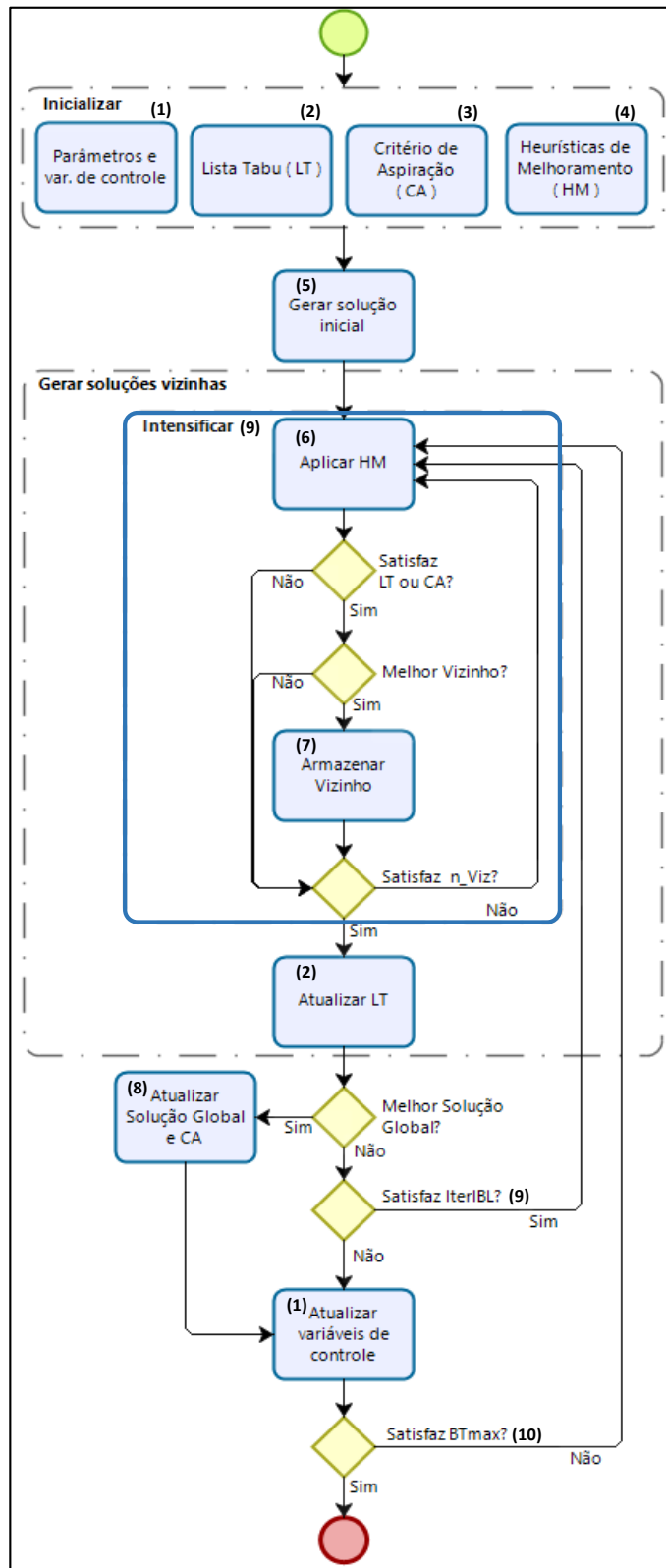
A Figura 9 representa uma sequência formada pelo depósito e mais 9 clientes, contendo 3 rotas. A primeira rota inicia na posição 1 e termina na posição 3, contempla os clientes 6, 1 e 9, a segunda rota inicia na posição 4 e termina na posição 6, contempla os clientes 2, 4 e 7 e, por fim, a terceira rota inicia na posição 7 e termina

na posição 9, contempla os clientes 5, 8 e 3. Ao término da primeira rota, o veículo retorna para a posição 0 (depósito), sendo esta, posição de referência para iniciar a segunda rota e consecutivamente a terceira rota.

2.2.1.2.2 Busca Tabu

De acordo com Cordeau *et al.* (2002), as características da BT oferecerem melhores resultados ao PRV quando comparado a outros métodos. Toth e Vigo (2002 e 2003) obtiveram os melhores resultados através da BT para resolução dos 14 problemas propostos por Christofides e Elion (1969). Apresentado originalmente por Glover e Laguna (1997), a BT procura avançar para uma solução melhor que a anterior através de um algoritmo de busca local, guiando este algoritmo dentro do espaço de soluções até satisfazer uma determinada condição de parada. Baseado no pseudocódigo proposto por Rodrigues *et al.* (2002), a Figura 10 e Figura 11, apresentam respectivamente o fluxograma e o pseudocódigo da BT empregados neste estudo. A seguir, é descrita a maneira como cada uma das etapas presentes neste fluxograma é empregada neste trabalho, sendo a solução representada por n posições.

Figura 10 - Fluxo do processo da Busca Tabu



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 – Pseudocódigo da Busca Tabu

```
Procedimento BT
01. Inicializar parâmetros e variáveis de controle;
02. Gerar solução inicial;
03. Inicializar LT; {Lista Tabu}
04. Inicializar CA; {Critério de aspiração}
05. Inicializar HM; {Heurísticas de Melhoramento}
06. enquanto não satisfaz BTmax faça
    07. Aplicar HM para obter vizinhos;
    08. Selecionar o melhor_vizinho dos vizinhos de acordo com a FO;
    09. se melhor_vizinho não é LT ou atende CA então
        10. Atualizar LT;
        11. Atualizar CA;
    12. fim se;
    13. se melhor_vizinho é a melhor solução até o momento então
        14. melhor_solução recebe melhor_vizinho;
    15. senão se satisfaz Iter/BL então {política de intensificação}
        16. Intensificar HM;
        17. Retornar para passo 08;
    18. fim se;
    19. Atualizar parâmetros e variáveis de controle;
20. fim enquanto;
Fim BT;
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

a) parâmetros e variáveis de controle (1): consiste do conjunto de parâmetros empregados na BT. O parâmetro *BTmax* refere-se ao número máximo de iterações permitido sem aprimoramento da melhor solução. O parâmetro *n_Viz* refere-se ao número de vizinhos gerados a cada iteração e o parâmetro *tamTabu* representa o número de movimentos armazenados na Lista Tabu;

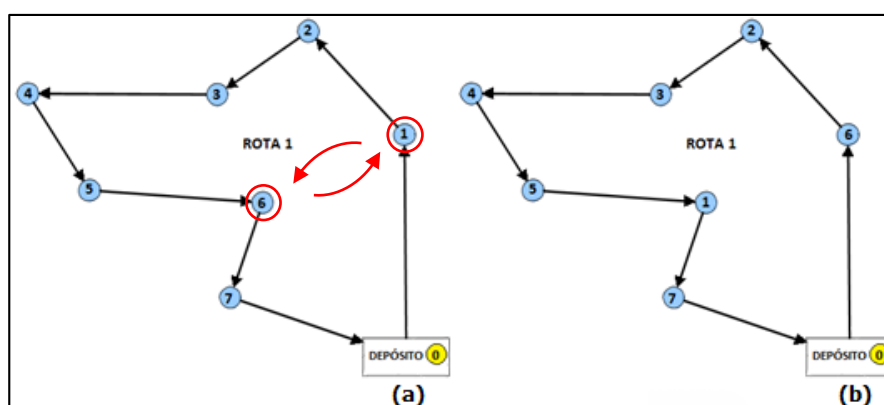
b) Lista Tabu (2): armazena os movimentos empregados na geração das soluções das últimas *tamTabu* iterações. A Lista Tabu proíbe que estes movimentos sejam utilizados para gerar novas soluções, evitando que a busca retorne a soluções recentemente visitadas;

c) critério de aspiração (3): permite aceitar uma solução mesmo que ela tenha sido gerada por um movimento presente na Lista Tabu. Neste trabalho, será aceita uma solução com base neste critério quando, apesar de ter sido gerada por um movimento tabu, esta solução for melhor que a melhor solução conhecida até o momento;

d) heurísticas de melhoramento (4): buscam obter soluções vizinhas de qualidade superior à solução atual por meio de alterações na configuração desta solução. Propõe-se neste trabalho a utilização de seis heurísticas: *Swap Intra-route*, *Swap Inter-route*, *k-opt*, *Shift Request*, *Rearrange Request* e *Two Optimal*

Insertion (TOI). Na técnica *Swap*, ocorrem trocas simples entre vértices escolhidos aleatoriamente (normalmente dois vértices) em busca de uma nova configuração da solução que apresente um custo menor. As trocas entre vértices podem ocorrer dentro da mesma rota, denominado *Swap Intra-route* (V_1) e entre rotas, denominado *Swap Inter-route* (V_2). A Figura 12 apresenta a técnica V_1 , onde os clientes 1 e 6 são escolhidos aleatoriamente (a). O cliente 1 é transferido para a posição do cliente 6 e, da mesma forma, o cliente 6 é transferido para a posição do cliente 1 (b).

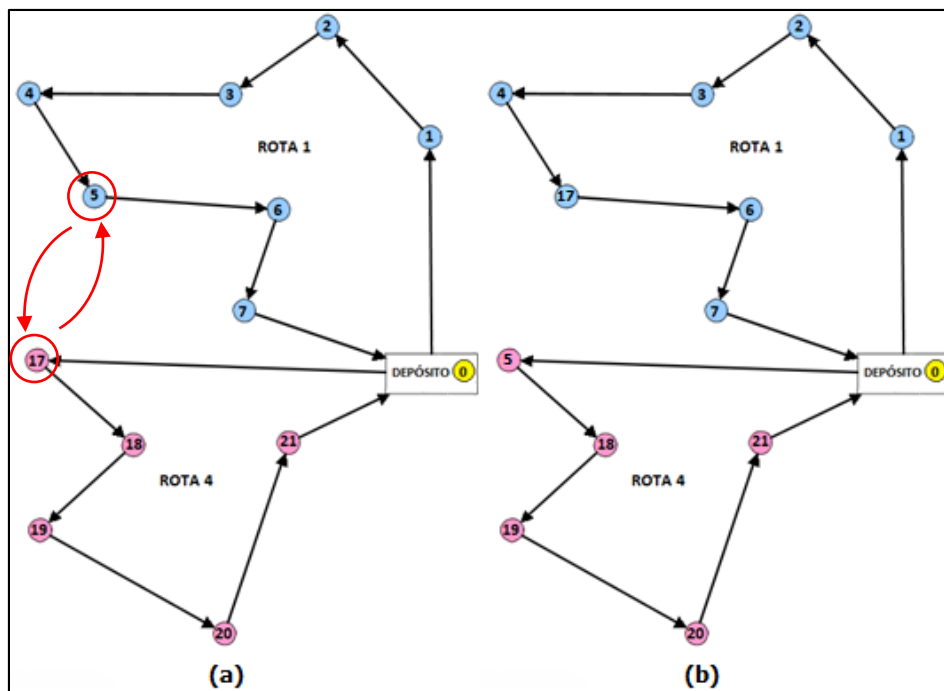
Figura 12 - Representação da heurística *swap intra-route*



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 13 apresenta a técnica V_2 , onde os clientes 5 e 17 são escolhidos aleatoriamente (a) em rotas diferentes. O cliente 5 da rota 1 é transferido para a posição do cliente 17 da rota 4 e, da mesma forma, o cliente 17 da rota 4 é transferido para a posição do cliente 5 da rota 1 (b).

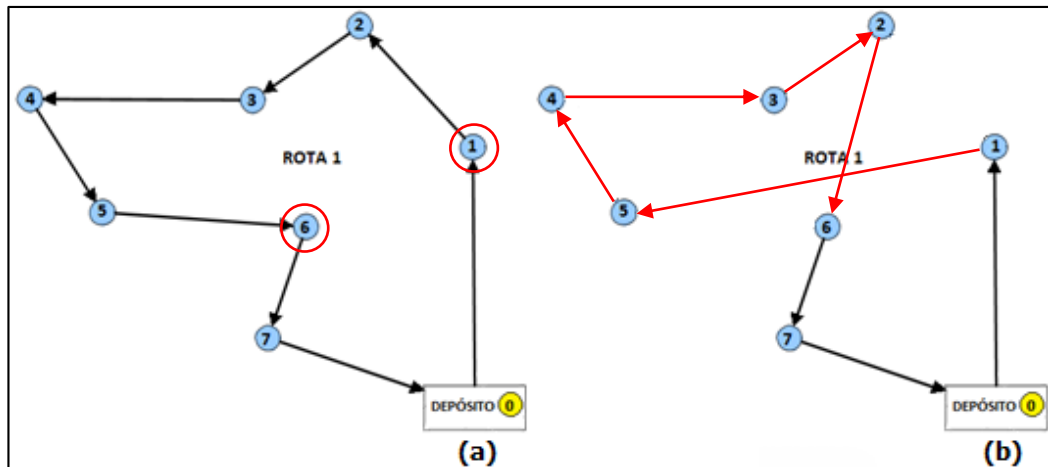
Figura 13 - Representação da heurística *swap inter-route*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na técnica *k-opt*, apresentada por Lin (1965), k arestas são removidas da rota e as arestas restantes são reconectadas de maneira diferente que a original. Dentre os mecanismos *k-opt*, destacam-se como mais utilizados os mecanismos *2-opt* e *3-opt*, sendo neste trabalho adotado o *2-opt* (V_3), onde dois trechos de uma rota são removidos e dois novos são criados para interligar os clientes que ficaram desconectados (THANGIAH; PETROVIC, 1997). A Figura 14 apresenta um exemplo do mecanismo *2-opt*, onde os clientes 1 e 6 são escolhidos aleatoriamente. Assim, os trechos entre os clientes 1 - 2 e 5 - 6 são removidos e novos caminhos são criados para interligar o cliente 1 - 5 e 2 - 6, sendo também alterada a ordem de visita aos clientes 2-3-4-5 para atender a nova sequência.

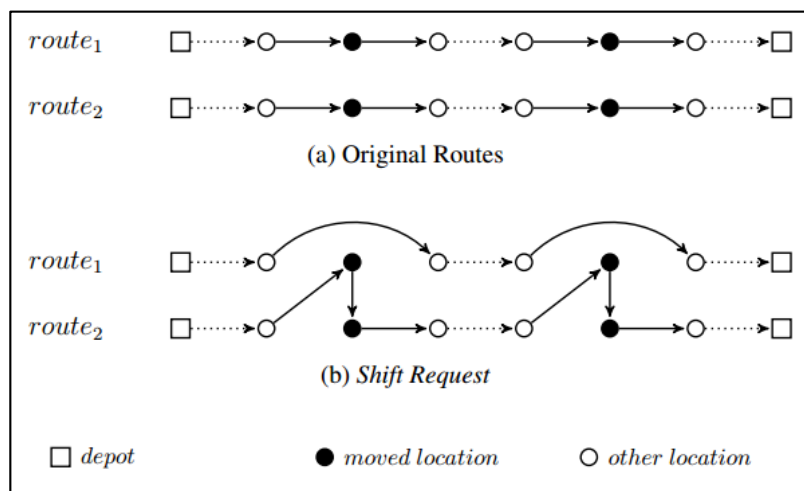
Figura 14 - Representação da heurística 2-opt



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na heurística *Shift Request* (V_4), apresentada por Li e Lim (2003), propõe-se mover um cliente para outra rota. Um par de rotas r_1 e r_2 , tal que $r_1 \neq r_2$, é selecionado aleatoriamente. Um cliente aleatório de r_1 é removido e inserido em uma posição aleatória e viável de r_2 , de modo que resulte na minimização do custo. A Figura 15 (b) representa o conceito desta heurística.

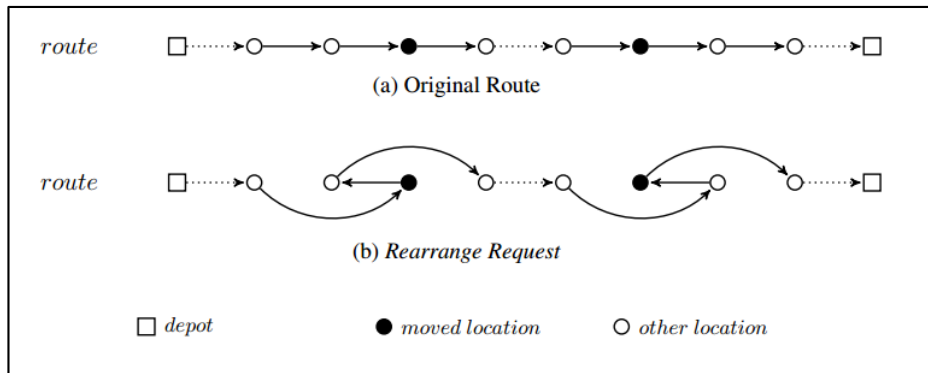
Figura 15 - Representação da heurística *Shift Request*



Fonte: Li e Lim (2003).

Li e Lim (2003) apresentaram em seu artigo outra técnica heurística denominada *Rearrange Request* (V_5). Nesta técnica, os movimentos acontecem dentro da mesma rota r , onde um cliente escolhido aleatoriamente é inserido em outra posição da mesma rota r , também escolhida aleatoriamente. A Figura 16 (b) representa o conceito desta heurística.

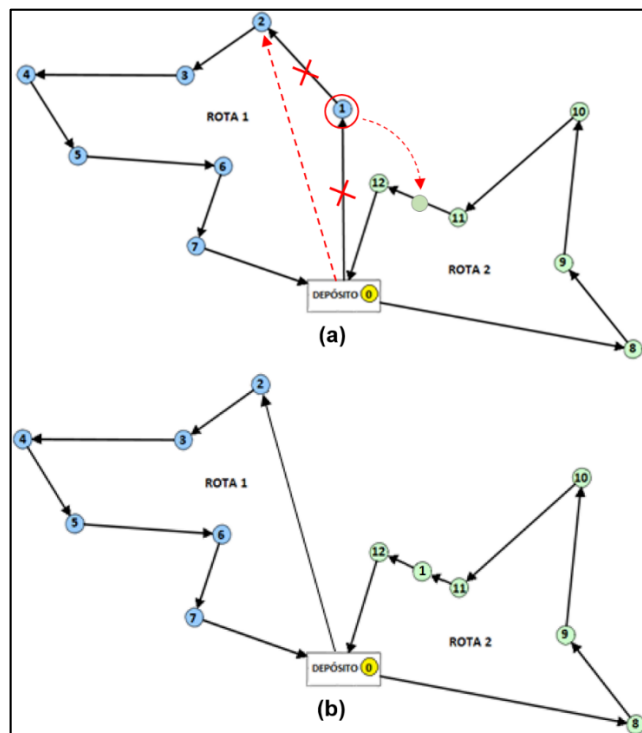
Figura 16- Representação da heurística *Rearrange Request*



Fonte: Li e Lim (2003).

Por fim, Tavakoli e Sami (2013) apresentaram a heurística *Two Optimal Insertion* - TOI (V₆). De forma similar à heurística *Shift Request*, um par de rotas $r1$ e $r2$, tal que $r1 \neq r2$, é selecionado aleatoriamente. Em seguida, um cliente é selecionado aleatoriamente na rota $r1$. O cliente selecionado então é inserido ao lado de seu vizinho mais próximo localizado na rota $r2$. A Figura 17 (b) representa o conceito da técnica.

Figura 17 - Representação da heurística *Two Optimal Insertion* (TOI)



Fonte: Elaborado pelo autor.

e) gerar solução inicial (5): neste trabalho, a solução inicial poderá ser gerada de duas diferentes formas, pelo emprego da heurística do vizinho mais próximo (TYAGI, 1968) ou de maneira aleatória;

f) aplicar HM (6): a partir da solução atual, é gerada uma solução vizinha com cada uma das seis heurísticas de melhoramento. Ao final, permanece aquela solução vizinha de melhor qualidade entre todas geradas;

g) armazenar vizinho (7): é realizada a verificação se a solução vizinha gerada na etapa anterior é melhor que a solução vizinha armazenada;

h) atualizar solução global e CA (8): a melhor solução local é comparada com a melhor solução global, permanecendo assim como solução global a solução que apresentar a melhor qualidade, e, do mesmo modo, o critério de aspiração. Adicionalmente, caso encontrada uma nova solução global, esta é adicionada ao conjunto de soluções elite (ver Seção 2.2.1.2.3 Algoritmo Genético);

i) intensificar (9): quando o processo padrão de busca em vizinhança da BT não fornece uma solução melhor que a solução global atual, por uma quantidade de iterações igual a I_{terIBL} , adota-se um processo de intensificação caracterizado pela repetição das etapas (6) e (7);

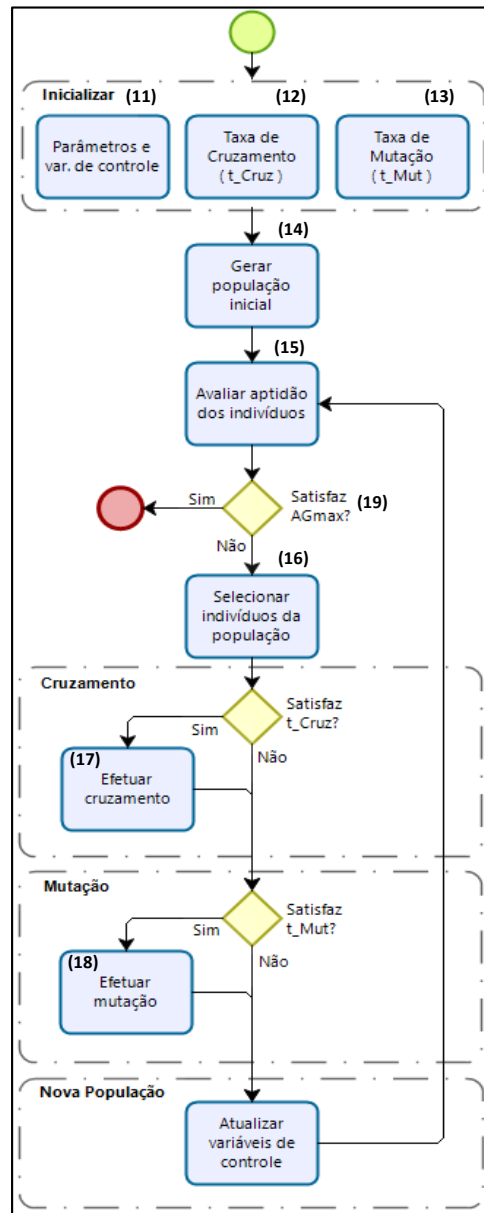
j) satisfaz critério de parada (10): o critério de parada está baseado no número de iterações sem aprimoramento da melhor solução. Este número máximo é definido pelo parâmetro BT_{max} .

2.2.1.2.3 Algoritmo Genético

Originalmente proposto por Holland, em 1975, o Algoritmo Genético (AG) baseia-se no princípio Darwiniano de seleção natural, onde os indivíduos mais aptos são selecionados para reprodução, perpetuando seu código genético para as próximas gerações. Estes indivíduos, denominados cromossomos (REEVES, 2003), são recombinados com base em conceitos da genética, por meio do emprego de operadores de seleção, cruzamento e mutação, e são guiados por uma função objetivo em busca de características individuais desejáveis. Baseado no pseudocódigo proposto por Holland (1975), a Figura 18 e Figura 19 apresentam respectivamente o fluxograma e o pseudocódigo do AG empregado neste estudo. Informações adicionais sobre a metaheurística AG podem ser encontradas em

Michalewicz (1999) e Goldberg (1989). A seguir, é descrita a maneira como cada uma das etapas presentes neste fluxograma (Figura 18) é empregada neste trabalho, sendo a solução representada de forma idêntica à BT, onde cada uma das n posições representa um cliente do problema e sua sequência representa a ordem de visitas (Figura 9).

Figura 18 - Fluxo do processo do Algoritmo Genético



Fonte: Elaborado pelo autor.

a) parâmetros e variáveis de controle do AG (11): consiste dos parâmetros empregados no AG. O parâmetro $AGmax$ refere-se ao número máximo de iterações

sem aprimoramento do melhor indivíduo da população e *tamPop* define o tamanho da população;

b) taxa de cruzamento (12) e taxa de mutação (13): o emprego dos operadores de cruzamento e de mutação é definido com base nos parâmetros *t_Cruz* e *t_Mut* (REEVES, 2003), cujos valores são escolhidos arbitrariamente;

c) gerar população inicial (14): de acordo com Talbi (2009), nas metaheurísticas populacionais, a geração de uma população inicial deve estar baseada em estratégias que favoreçam a diversificação a fim de evitar a ocorrência de convergência prematura. Deste modo, a solução inicial no AG é representada por uma população inicial gerada de forma aleatória e independente, contendo o número de indivíduos (cromossomos) previamente estabelecido;

Figura 19 - Pseudocódigo do Algoritmo Genético

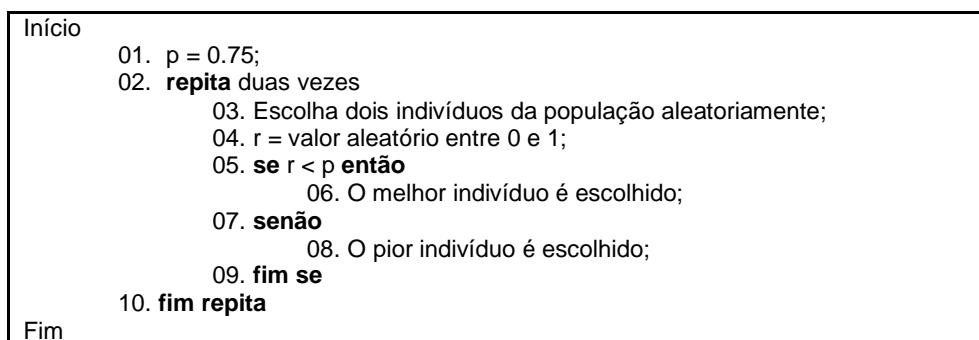
```
Procedimento AG  
01. Inicializar parâmetros e variáveis de controle;  
02. Inicializar t_Cruz; {Taxa de cruzamento}  
03. Inicializar t_Mut; {Taxa de mutação}  
04. Gerar população inicial;  
05. enquanto não satisfaz AGmax faça  
    06. Selecionar uma subpopulação da população;  
    07. se atender t_Cruz então  
        08. Obter filho do cruzamento da subpopulação;  
    09. fim se;  
    10. se atender t_Mut então  
        11. Executar mutação em filho;  
    12. fim se;  
    13. Obter nova população;  
    14. Atualizar parâmetros e variáveis de controle;  
15. fim enquanto;  
Fim AG;
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

d) avaliar aptidão dos indivíduos (15): submete para avaliação da FO os indivíduos da população inicial e os novos indivíduos gerados após a aplicação dos operadores de cruzamento e mutação;

e) selecionar indivíduos da população (16): tem como objetivo selecionar indivíduos para o cruzamento. Conforme Reeves (2003) e Dridi *et al.* (2010), os principais métodos de seleção são a roleta, a classificação e o torneio, sendo este último utilizado neste trabalho. O método de seleção por torneio compara os indivíduos, a procura de um conjunto de indivíduos mais aptos, com melhor *fitness*, sendo estes, ao final do processo, selecionados (MITCHELL;1999). A Figura 20 apresenta o pseudocódigo do método de seleção por torneio.

Figura 20 - Algoritmo básico do método de seleção por Torneio



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para realização da seleção de indivíduos, pode ser considerada a população completa ou um determinado número n de indivíduos, escolhidos com base em uma medida de qualidade, para formar uma subpopulação temporária. Deste grupo, o indivíduo selecionado dependerá de uma probabilidade p definida previamente. De acordo com Banzhaf *et al.* (1998), este método é o mais utilizado, pois oferece a vantagem de não exigir que a comparação seja feita entre todos os indivíduos da população. Adicionalmente, serão analisadas estratégias de elitismo baseadas nas propostas apresentadas em Michalewicz (1999) e Goldberg (1989);

f) efetuar cruzamento (17): tem como objetivo transmitir o material genético de soluções da população atual para seus filhos. A literatura apresenta diversas formas de promover o cruzamento, sendo para este trabalho adotado métodos que preservem a estrutura de permutação da solução, como o PMX e CX. Kumar, Bidhan e Kumar (2012) apresentam em seu estudo uma análise comparativa entre os operadores PMX (*Partially Matched Crossover*), CX (*Cycle Recombination Crossover*) e OX (*Ordered Crossover*). Os autores destacam a superioridade do PMX em relação aos demais operadores, baseado em dois pontos de corte escolhidos aleatoriamente. O PMX gera novos indivíduos escolhendo uma subsequência de um pai, preservando a ordem e posição do maior número de eventos possível (GOLDBERG; LINGLE, 1985 e MICHALEWICZ; 1999). Por exemplo, suponha dois pais (p_1 e p_2) os quais representam possíveis soluções para o PRV em um trajeto com nove eventos:

$$p_1 = (1\ 2\ 3\ | 4\ 5\ 6\ 7\ | 8\ 9)$$

$$p_2 = (4\ 5\ 2\ | 1\ 8\ 7\ 6\ | 9\ 3)$$

Os dois pontos de corte são representados por "|", sendo os filhos gerados da seguinte maneira:

1º - os segmentos entre os pontos de corte são trocados:

$$f1 = (? ? ? | 1 8 7 6 | ? ?)$$

$$f2 = (? ? ? | 4 5 6 7 | ? ?)$$

de forma que a troca define a relação: $1 \leftrightarrow 4$, $8 \leftrightarrow 5$, $7 \leftrightarrow 6$ e $6 \leftrightarrow 7$;

2º - completar os eventos baseado nos pais onde não ocorrer conflito:

$$f1 = (? 2 3 | 1 8 7 6 | ? 9)$$

$$f2 = (? ? 2 | 4 5 6 7 | 9 3)$$

onde entende-se por conflito quando os números se repetem;

3º - conflitos são resolvidos de acordo com a relação descrita acima, onde o 1 de f1 é substituído por 4 ($1 \leftrightarrow 4$) e do mesmo modo o 8 de f1 é substituído por 5. Este mesmo processo é repetido para o f2, gerando as seguintes soluções filhos:

$$f1 = (4 2 3 | 1 8 7 6 | 5 9)$$

$$f2 = (1 8 2 | 4 5 6 7 | 9 3)$$

Observar-se também no estudo, que o operador CX aproxima-se dos resultados do operador PMX em algumas iterações. Este operador baseia-se na ordem dos eventos, conforme mostrado no exemplo a seguir.

Sejam os pais (p1 e p2) representando uma solução do PRV em um trajeto de nove eventos:

$$p1 = (1 2 3 4 5 6 7 8 9)$$

$$p2 = (4 1 2 8 7 6 9 3 5)$$

1º - retira-se do pai p1 o primeiro evento do filho f1:

$$f1 = (1 ? ? ? ? ? ? ?)$$

2º - o próximo evento do filho f1 equivale ao primeiro evento do pai p2 = 4, porém a posição que ocupará no filho f1 é equivalente à posição que ocupa no pai p1:

$$f1 = (1 \ ? \ ? \ 4 \ ? \ ? \ ? \ ?)$$

3º - seguindo esta lógica, a quarta posição no pai p1 equivale ao evento 8 no pai p2. O evento 8 no pai p1 está na oitava posição, assim segue:

$$f1 = (1 \ ? \ ? \ 4 \ ? \ ? \ ? \ 8 \ ?)$$

$$f1 = (1 \ ? \ 3 \ 4 \ ? \ ? \ ? \ 8 \ ?)$$

$$f1 = (1 \ 2 \ 3 \ 4 \ ? \ ? \ ? \ 8 \ ?)$$

A próxima posição seria o evento 1 (o evento 2 em p1 equivale ao evento 1 em p1), porém ocorre um conflito devido ao evento 1 já existir no filho f1, deste modo finalizando o ciclo.

4º - os eventos remanescentes “?” serão formados pelos eventos do pai p2:

$$f1 = (1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 7 \ 6 \ 9 \ 8 \ 5)$$

De maneira similar, o filho f2 é formado, resultando:

$$f2 = (4 \ 1 \ 2 \ 8 \ 5 \ 6 \ 7 \ 3 \ 9)$$

O operador CX preserva a posição absoluta dos elementos na sequência o pai (MICHALEWICZ; 1999).

Em cada iteração do AG e satisfazendo o valor t_Cruz (Figura 18), ambos os operadores são usados, preservando para a etapa seguinte (mutação) o resultado do operador que apresentar o melhor fitness, isto é, o melhor valor de FO;

g) efetuar mutação (18): tem como propósito principal prover aumento da diversidade nos indivíduos da população através de pequenas alterações nos genes destes indivíduos (TALBI, 2009). É um mecanismo importante no AG, pois permite a manutenção da diversidade e previne a estagnação da população. Seguindo o mesmo conceito do cruzamento, a mutação ocorre quando o valor t_Mut (Figura 18) é satisfeito e o indivíduo é submetido ao operador de mutação. Para o PRV, Talbi (2009) sugere operadores baseados em técnicas de permutação como troca, inversão e

inserção. Neste sentido, será adotada a técnica troca (*swap*), onde dois genes são sorteados aleatoriamente e seus conteúdos trocados entre si (ver Seção 2.2.1.2.2 item d);

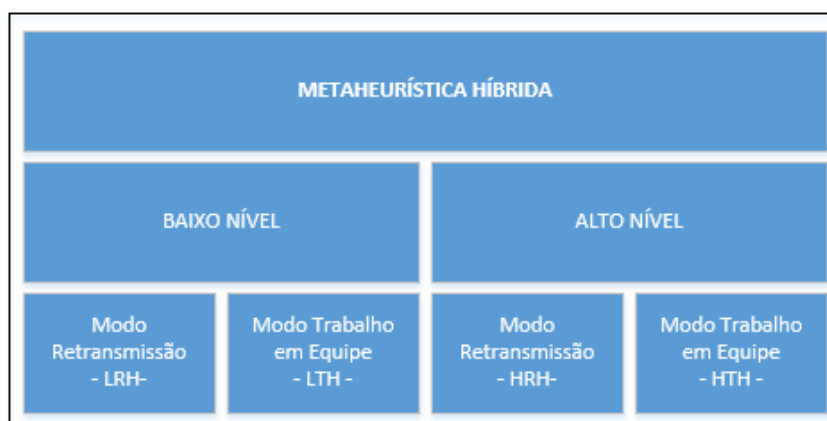
h) satisfaz critério de parada (19): o critério de parada determina o número máximo de gerações (iterações) sem aprimoramento da população. O número máximo de iterações é definido pelo parâmetro *AGmax*.

2.2.1.2.4 Algoritmo Híbrido

Uma abordagem híbrida permite combinar as melhores características de duas diferentes técnicas. Trabalhos têm mostrado que as abordagens que combinam metaheurísticas geram resultados melhores que as metaheurísticas empregadas de maneira individual (GENDREAU; POTVIN, 2010; TALBI, 2009).

Dentre as diferentes formas de combinação classificadas por Talbi (2009), será adotada neste trabalho uma metaheurística da classe baixo nível híbrida de retransmissão, em inglês, *low-level relay hybrid* (LRH), conforme apresentado na Figura 19.

Figura 21 - Classificação das metaheurísticas híbridas



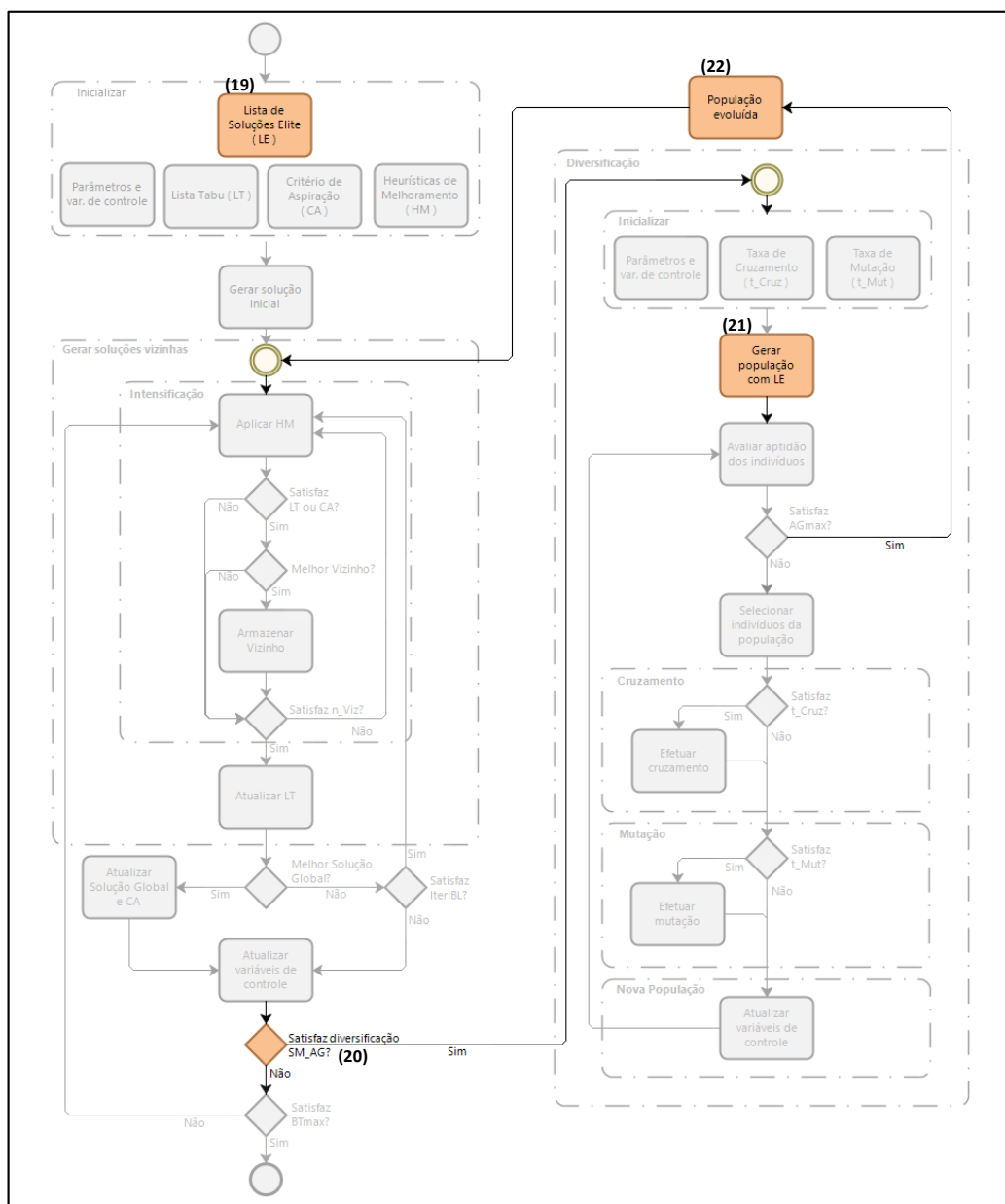
Fonte: Adaptado de TALBI (2009)

A classificação LRH representa as metaheurísticas híbridas em que uma determinada metaheurística é incorporada a outra metaheurística. Neste sentido, o trabalho propõe-se a combinar as metaheurísticas AG e BT, resultando na

incorporação das características de uma metaheurística populacional em uma metaheurística de busca local.

A incorporação do AG à BT tem como principal objetivo proporcionar uma maior diversificação da busca. Neste sentido, Goldberg (1989) apresenta a técnica *Serial Selection*, onde a população do AG é reiniciada para garantir a diversidade dos indivíduos. Atendendo o critério de diversificação *SM_AG* sem apresentar melhora na Função Objetivo (FO), a BT é interrompida e o AG é acionado. A população inicial do AG será concebida com base nas melhores soluções encontradas pela BT (*n_elite*), sendo o restante da população inicial complementada de forma aleatória e independente (GOLDBERG; 1989). Após o AG atingir seu critério de parada definido em *AGmax*, o melhor indivíduo da população é selecionado e enviado à BT, onde será considerado como solução inicial. A seguir, são descritas as etapas presentes no fluxograma (Figura 22) e pseudocódigo do Algoritmo Híbrido (Figura 23) e que permitem a combinação do AG com a BT.

Figura 22 - Fluxo do processo do Algoritmo Híbrido



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Pseudocódigo do Algoritmo Híbrido

```

Procedimento AH
01. Inicializar parâmetros e variáveis de controle da BT;
02. Inicializar parâmetros e variáveis de controle do AG;
03. Gerar solução inicial;
04. Inicializar LT; {Lista Tabu}
05. Inicializar CA; {Critério de aspiração}
06. Inicializar HM; {Heurísticas de Melhoramento}
07. Inicializar t_Cruz; {Taxa de cruzamento}
08. Inicializar t_Mut; {Taxa de mutação}
09. enquanto não satisfaz BTmax faça
    10. Aplicar HM para obter vizinhos;
    11. Selecionar o melhor_vizinho dos vizinhos de acordo com a FO;
    12. se melhor_vizinho não é LT ou atende CA então
        13. Atualizar LT;
        14. Atualizar CA;
    15. fim se;
    16. se melhor_vizinho é a melhor solução até o momento então
        17. melhor_solução recebe melhor_vizinho;
    18. senão se satisfaz IterIBL então {política de intensificação}
        19. Intensificar HM;
        20. Retornar para passo 11;
    21. fim se;
    22. se satisfaz SM_AG então {diversificação}
        23. Gerar população inicial a partir da melhor_solução;
        24. enquanto não satisfaz AGmax faça
            25. Selecionar uma subpopulação da população;
            26. se atender t_Cruz então
                27. Obter filho do cruzamento da subpopulação;
            28. fim se;
            29. se atender t_Mut então
                30. Executar mutação no filho;
            31. fim se;
            32. Obter nova população;
            33. Atualizar parâmetros e variáveis de controle do AG;
        34. fim enquanto;
        35. Reiniciar BTmax;
    36. fim se;
    37. Atualizar parâmetros e variáveis de controle da BT;
38. fim enquanto;
Fim AH;

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

a) lista de soluções elite – LE (19): tem a função de armazenar as n_{elite} soluções encontradas pela BT, para, quando satisfeito o critério de diversificação, compor parte da população inicial do AG;

b) satisfaz diversificação *SM_AG* (20): satisfeito o critério, a execução da BT é suspensa e inicia-se a execução do AG até satisfazer o critério de parada definido em *AGmax*;

c) gerar população com LE (21): a lista de soluções elite (18) da BT comporá a população inicial do AG, sendo o restante da população complementado aleatoriamente e independentemente (GOLDBERG; 1989);

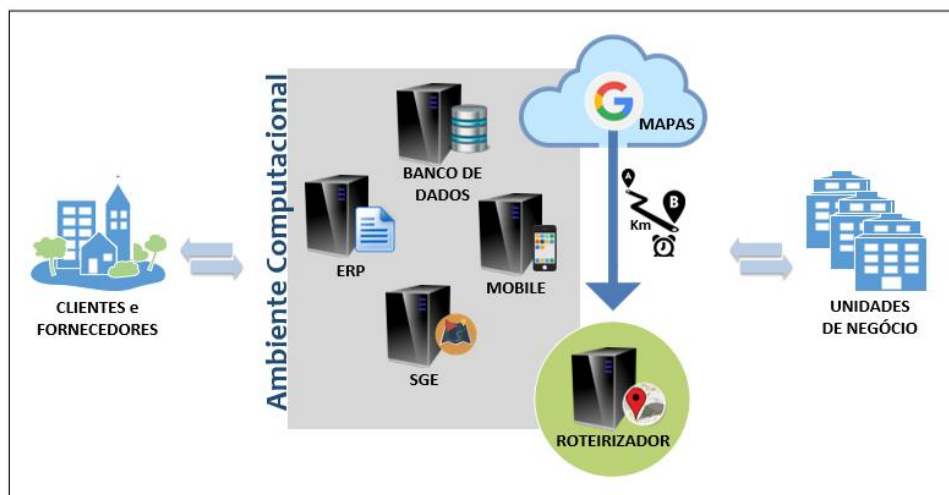
d) população evoluída (22): satisfeito o critério de parada definido em *AGmax*, os indivíduos gerados pelo AG são avaliados pela FO e selecionado o indivíduo que apresentar o melhor *fitness*, sendo este enviado como solução inicial para a BT retomar o processo de busca;

2.2.2 Arquitetura computacional

A Transportadora entende como vantagem em relação a concorrentes a automação de processos através da informatização e, com base nisso, optou-se pelo desenvolvimento de um software para roteirização. A empresa possui um ambiente computacional (AC) próprio, instalado em um datacenter próprio, com equipe interna de Tecnologia da Informação e Automação (TIA) formada por 16 profissionais com conhecimento nas áreas de desenvolvimento de software, administração de servidores e infraestrutura de datacenter, telecomunicações, mobilidade e automação logística. O desenvolvimento do software de roteirização foi conduzido internamente e, do mesmo modo, a instalação, configuração e integração do software no AC.

A Figura 24 apresenta o AC que fornece suporte para toda operação logística da empresa e possibilita a troca de informações (dados) com clientes, unidades de negócio e fornecedores. Formado por diversos equipamentos, conectados a diversas operadoras de telecomunicações, o AC possibilita que o Roteirizador receba as informações referentes aos clientes e as suas mercadorias, de forma que depois de gerado o roteiro de visitas, envie as informações para as unidades de negócio.

Figura 24 - Arquitetura do ambiente computacional da Transportadora



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste trabalho, serão detalhados apenas os componentes do AC que compartilham informações com o Roteirizador.

a) banco de dados: é responsável pelo armazenamento das informações de toda a empresa, bem como a replicação destas informações para os demais sistemas como o ERP, MOBILE, SGE, dentre outros;

b) ERP: por meio do sistema ERP, é efetuada a inserção e manutenção de grande parte das informações da empresa, como a emissão de conhecimentos de frete, notas fiscais, manutenção da ficha cadastral dos clientes, apuração de impostos, etc. Neste sistema, são elaborados os romaneios de frete, que contêm a relação de eventos (coletas e entregas) por veículo;

c) mapas: com base na relação de eventos enviada pelo ERP, é efetuada a busca, em bases de dados cartográficas e georreferenciadas, das coordenadas geográficas de cada evento para construir as matrizes de distância e tempo. As coordenadas e matrizes são então registradas no banco de dados;

d) Roteirizador: recebe a relação de eventos do ERP, complementa a relação com outras informações armazenadas no banco de dados e inicia o processo de construção/otimização das rotas de cada região;

e) mobile: concluída a operação de carregamento dos veículos no depósito, os romaneios são gerados (Figura 4) e enviados para os smartphones dos motoristas destes veículos. O sistema mobile tem o objetivo de orientar o motorista na sequência

de eventos, bem como retornar à situação em tempo real para a torre de logística - área responsável pelo controle de toda a distribuição logística da empresa;

f) SGE - sistema de gestão de eventos: conforme os eventos são realizados, o SGE recebe a posição de cada veículo através do mobile, analisa estas informações de acordo com um conjunto de regras de negócio e as apresenta para os analistas da torre de logística.

3 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados provenientes dos experimentos de sintonia dos parâmetros utilizados nos algoritmos e de sua validação, para os quais foram utilizadas instâncias de referência da literatura. Também são apresentados os resultados provenientes dos experimentos considerando casos reais, obtidos do ambiente operacional da Transportadora. Os experimentos foram executados em um computador com CPU Intel Xeon de 2 Ghz, com 4GB de memória RAM e sistema operacional CentOS Linux versão 7.3.1611. O software foi desenvolvido em linguagem C++ versão 4.8.5 20150623.

3.1 SINTONIA DOS PARÂMETROS E VALIDAÇÃO DO ALGORITMO

Uma vez desenvolvido o software de roteirização, os parâmetros de funcionamento do algoritmo de otimização foram definidos com base nos problemas-teste de roteamento de veículos com janela de tempo disponibilizados por Solomon (1987). As instâncias específicas para o problema com janela de tempo e coleta e entrega, apresentadas por Li e Lim (2003), preveem coletas e entregas na mesma rota, sem a necessidade de retornar ao depósito. Devido a esta característica, estas instâncias não foram utilizadas nos experimentos de sintonia e validação, pois não representam a realidade da Transportadora.

Na Tabela 5, são apresentados os parâmetros utilizados no algoritmo, sendo os valores fixos, previamente definidos na etapa de testes do software de roteirização, e os parâmetros ajustáveis, definidos por meio da realização dos experimentos de sintonia.

Tabela 5 – Parâmetros empregados no algoritmo de roteirização

Parâmetro		Tipo	Aplicação	Valor
<i>n_Viz</i>	Nº de vizinhos	Ajustável	BT	-
<i>tamTabu</i>	Tamanho da Lista Tabu	Ajustável	BT	-
<i>IterIBL</i>	Aciona intensificação após nº max iterações sem melhorar FO	Fixo	BT	200
<i>BTmax</i>	Nº máximo de iterações sem melhorar FO	Fixo	BT	1000
<i>t_Cruz</i>	Taxa de cruzamento	Ajustável	AG	-

<i>t_Mut</i>	Taxa de mutação	Ajustável	AG	-
<i>AGmax</i>	Nº máximo de gerações	Fixo	AG	500
<i>tamPop</i>	Tamanho da população	Fixo	AG	1000
<i>SM_AG</i>	Aciona AG após nº max iterações sem melhorar FO	Fixo	AH	300
<i>n_elite</i>	Tamanho da lista de soluções elite	Fixo	AH	10

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme especificado na Seção 2.2.1.1, a FO é definida com base em um somatório de termos, ponderados de acordo com a sua importância no processo de otimização. Para o presente estudo, os valores dos respectivos pesos foram fixados previamente na etapa de testes do software de roteirização, sendo definidos conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Ponderação dos fatores da FO

Parâmetro da FO		Tipo	Valor
<i>P_{DT}</i>	Distância	Fixo	1
<i>P_J</i>	Espaço de tempo após fechamento da janela	Fixo	100
<i>P_Q</i>	Capacidade em peso do veículo	Fixo	2
<i>P_{NV}</i>	Número de veículos	Fixo	10000

Fonte: Elaborado pelo autor

Solomon (1987) apresenta uma relação de problemas-teste divididos em três classes: R, C e RC, e duas séries: 1 e 2, sendo que as classes combinadas com as séries apresentam um conjunto de seis problemas, conforme exemplos: C101, C102, R104, R206, RC107, RC207, etc.

As classes se diferem quanto à posição geográfica dos clientes e o tamanho da respectiva janela de tempo. Para os problemas da classe R, as posições geográficas foram geradas aleatoriamente; na classe C, as posições geradas determinam agrupamentos de clientes; enquanto que a classe RC apresenta ao mesmo tempo ambas as características.

O tamanho da janela é definido pela série, sendo a série 1 com um horizonte de sequenciamento mais restrito, conseqüentemente reduzindo o número possível de clientes por rota. De modo diferente, a série 2 apresenta janelas de tempo mais amplas e possibilita um maior número de clientes por rota.

Para a sintonia dos parâmetros empregados nos algoritmos, foram analisados seis problemas teste com características R1, R2, C1, C2, RC1 e RC2, e escolhida a sequência 07 da relação de problemas, por esta apresentar o valor com melhor

resultado obtido por outros trabalhos, chegando assim ao seguinte conjunto de problemas: R107, R207, C107, C207, RC107 e RC207.

Cada problema foi analisado considerando 25, 50 e 100 clientes e os resultados obtidos foram comparados com os melhores resultados apresentados pelos seguintes autores (Tabela 7).

Tabela 7 – Lista de autores

Autores	Representação
Bent e Van Hentenryck (2001)	BVH
Rochat e Taillard (1995)	RT
Ropke e Pisinger (2005)	RP
Shaw (1997)	S97
Kohl <i>et. al.</i> (1999)	KDMSS
Larsen (1999)	L
Cook e Rich (1999)	CR
Kallehauge; larsen; Madsen (2000)	KLM
Irnich e Villeneuve (2005)	IV
Chabrier (2005)	C

Fonte: Elaborado pelo autor

Os experimentos de sintonia dos parâmetros utilizados nos algoritmos foram realizados em duas fases distintas, considerando o conjunto de seis problemas citados anteriormente. A Figura 25 apresenta cada uma das fases.

Figura 25 - Etapas do processo de experimentação

FASE I	
BUSCA TABU	Sintonia dos parâmetros n_Viz e $tamTabu$ com uso ou não da política de intensificação
FASE II	
ALGORITMO HÍBRIDO	Sintonia dos parâmetros t_Cruz e t_Mut , com uso dos valores identificados na FASE I que apresentaram o melhor resultado

Fonte: Elaborado pelo autor

Em ambas as fases do experimento, cada uma das diferentes possibilidades de valores dos parâmetros avaliadas foi executada 40 vezes, com o objetivo de analisar o comportamento médio do desempenho das técnicas na tarefa de varrer o espaço de soluções, bem como da qualidade das soluções geradas. Os resultados obtidos com este conjunto de experimentos serão apresentados em tabelas seguindo o padrão representado pelas Tabela 8 e 9.

Tabela 8 - Resultados médios da Busca Tabu sem e com intensificação

Instância	Busca Tabu (BT)		BT + Intensificação			Dif.
	DT	DP	DT	DP	PABT	
C107						
R107						
RC107						
C207						
R207						
RC207						

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 8 mostra o formato com que serão apresentados os resultados obtidos na Fase I, para cada problema-teste definido para realização dos experimentos de sintonia dos parâmetros. Os resultados a serem apresentados referem-se ao melhor valor médio da distância total (DT) dentre as combinações de valores dos parâmetros testadas, o desvio padrão do correspondente conjunto de resultados (DP), os valores dos parâmetros n_Viz e $tamTabu$ (PABT) que forneceram o melhor valor médio para a medida DT, e a diferença percentual entre os resultados obtidos a partir da execução da Busca Tabu sem o emprego da política de intensificação e com o seu emprego.

Tabela 9 - Resultados médios da Busca Tabu com intensificação e Algoritmo Híbrido

Instância	BT + Intensificação			Algoritmo Híbrido			Dif.
	DT	DP	PABT	DT	DP	PAAH	
C107							
R107							
RC107							
C207							
R207							
RC207							

Fonte: Elaborado pelo autor

Por sua vez, a Tabela 9 mostra o formato com que serão apresentados os resultados obtidos na Fase II, para os mesmos problemas-teste avaliados na Fase I. Os resultados a serem apresentados referem-se, também, ao melhor valor médio da distância total (DT) dentre as combinações de valores dos parâmetros testadas, o desvio padrão do correspondente conjunto de resultados (DP), e os valores dos parâmetros t_Cruz e t_Mut (PAAH) que forneceram o melhor valor médio para a medida DT. Cabe observar que, na Tabela 9, são replicados os resultados apresentados na Tabela 8, referentes ao algoritmo Busca Tabu com intensificação (BT

+ Intensificação). Os melhores parâmetros n_Viz e $tamTabu$ identificados na Fase I são empregados na Fase II.

Tabela 10 – Comparativo do melhor valor dos experimentos com o ótimo

Instância	Algoritmo Híbrido (AH)		Ótimo		GAP	
	DT	NV	DT	NV	DT	NV
C107						
R107						
RC107						
C207						
R207						
RC207						

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, com o objetivo de validar os algoritmos, serão apresentados os melhores resultados obtidos, conforme a Tabela 10. Para cada problema teste avaliado, será indicado o melhor resultado encontrado para a distância total (DT) e para o número de veículos (NV), e a diferença percentual (GAP) destes valores em relação aos melhores valores conhecidos, publicados pelos autores indicados na Tabela 7.

3.1.1 Sintonia dos Parâmetros

Nesta seção, são apresentados os resultados dos experimentos realizados para a definição dos parâmetros ajustáveis (Tabela 5) empregados na Busca Tabu e no Algoritmo Genético.

a) FASE I – Busca Tabu sem intensificação e com intensificação: a primeira fase de experimentos teve o objetivo de analisar a influência dos parâmetros n_Viz e $tamTabu$ (Tabela 5) no funcionamento do algoritmo Busca Tabu, sem e com o emprego de uma política de intensificação. A Tabela 11 apresenta os valores avaliados para n_Viz e a Tabela 12 os valores avaliados para $tamTabu$.

Tabela 11 - Relação de valores para a quantidade de vizinhos

n_Viz
200

400
600

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores apresentados nas Tabelas 11 e 12 foram combinados gerando um total de 42 conjuntos de parâmetros para realização dos experimentos, sendo 21 experimentos realizados sem o uso da política de intensificação e 21 com o uso desta política.

Tabela 12 - Relação de valores para o tamanho da Lista Tabu

<i>tamTabu</i>
15
25
50
75
100
200
400

Fonte: Elaborado pelo autor

Cada combinação de parâmetros foi empregada para solução dos problemas-teste definidos anteriormente, assumindo as quantidades de 25, 50 e 100 clientes, gerando um total de 126 experimentos, sendo cada experimento executado 40 vezes. A Tabela 13 apresenta os resultados dos experimentos para as instâncias com 25 clientes.

Tabela 13 - Resultados médios da Busca Tabu sem e com intensificação - 25 clientes

Instância	Busca Tabu (BT)		BT + Intensificação			Dif.
	DT	DP	DT	DP	PABT	
C107	270,95	11,40	253,78	12,42	400 015	-6,34%
R107	502,40	22,94	489,27	16,77	600 015	-2,61%
RC107	346,07	48,31	329,87	33,12	200 075	-4,68%
C207	307,14	13,81	305,53	12,33	400 400	-0,52%
R207	548,49	5,48	547,40	4,88	200 050	-0,20%
RC207	568,41	38,50	543,70	28,58	200 015	-4,35%

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos resultados apresentados na Tabela 13, observa-se que a política de intensificação aplicada à Busca Tabu contribuiu significativamente com a redução da medida DT em todas instâncias com 25 clientes. A definição dos melhores valores para os parâmetros n_Viz e *tamTabu* baseou-se no número de vezes que cada um deles apresentou o melhor resultado para a medida DT, no conjunto de instâncias avaliadas, tendo sido definido 200 e 15, respectivamente. Cada execução para uma

instância de 25 clientes consumiu, em média, 21 segundos. A Tabela 14 apresenta os resultados dos experimentos para as instâncias com 50 clientes.

Tabela 14 - Resultados médios da Busca Tabu sem e com intensificação - 50 clientes

Instância	Busca Tabu (BT)		BT + Intensificação			Dif.
	DT	DP	DT	DP	PABT	
C107	530,62	34,48	527,12	38,52	600 100	-0,66%
R107	856,65	42,56	853,71	39,79	600 100	-0,34%
RC107	852,06	92,02	866,56	99,07	400 015	1,70%
C207	687,35	81,04	642,48	76,77	200 015	-6,53%
R207	767,10	46,69	752,84	38,39	600 025	-1,86%
RC207	1036,56	156,57	987,31	127,84	400 025	-4,75%

Fonte: Elaborado pelo autor

Do mesmo modo que para o caso de 25 clientes, com base nos resultados apresentados na Tabela 14, observa-se que a política de intensificação aplicada à Busca Tabu contribuiu significativamente para a redução da medida DT, em todas instâncias com 50 clientes, exceto a instância RC107. Os valores 600 e 25 destacaram-se como os melhores para os parâmetros n_{Viz} e $tamTabu$, respectivamente, sendo este último escolhido devido ao melhor resultado para a medida DT obtido na instância RC207. Cada execução para uma instância de 25 clientes consumiu, em média, 58 segundos. A Tabela 15 apresenta os resultados dos experimentos para as instâncias com 100 clientes.

Tabela 15 - Resultado médio da Busca Tabu sem e com intensificação - 100 clientes

Instância	Busca Tabu (BT)		BT + Intensificação			Dif.
	DT	DP	DT	DP	PABT	
C107	1280,20	113,29	1334,92	106,80	600 400	4,27%
R107	1419,92	53,68	1448,84	61,10	600 015	2,04%
RC107	1680,21	78,92	1662,19	73,16	600 400	-1,07%
C207	1568,08	256,63	1407,54	203,26	600 200	-10,24%
R207	1285,04	139,13	1288,42	117,37	600 100	0,26%
RC207	1657,61	106,85	1638,09	119,42	600 015	-1,18%

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos resultados apresentado na Tabela 15, observa-se que a política de intensificação aplicada à Busca Tabu contribuiu com a redução da medida DT em três das seis instâncias avaliadas. As instâncias RC107, C207 e RC207 apresentaram redução da medida DT com destaque para a instância C207, onde foi verificado um ganho superior a 10%. Os resultados obtidos para a instância R207 apresentaram uma pequena diferença de 0,26% e as instâncias C107 e R107 não apresentaram

melhoria da medida DT com a intensificação. Cada execução consumiu, em média, 151 segundos, e, em todas as instâncias avaliadas, o valor 600 para o parâmetro n_Viz foi o que forneceu o melhor resultado. Para o parâmetro $tamTabu$, definiu-se o valor 200 devido ao seu uso ter apresentado o maior ganho para a medida DT. A Tabela 16 apresenta os melhores valores de n_Viz e $tamTabu$ definidos para as instâncias de 25, 50 e 100 clientes, quando aplicada a Busca Tabu com intensificação.

Tabela 16 - Parâmetros de sintonia da Busca Tabu

Clientes	n_Viz	$tamTabu$
≤ 25	200	15
26 – 74	200	25
≥ 75	600	200

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores apresentados na Tabela 16 serão utilizados nos experimentos com instâncias reais, de acordo com a quantidade de clientes presentes na situação avaliada;

b) FASE II – Algoritmo Híbrido: A segunda fase de experimentos teve o objetivo de analisar a influência dos parâmetros t_Cruz e t_Mut (Tabela 5) no funcionamento do Algoritmo Híbrido, utilizando para os parâmetros n_Viz e $tamTabu$ os melhores valores identificados na Fase I, para cada uma das instâncias avaliadas. A Tabela 17 apresenta os valores avaliados para t_Cruz e a Tabela 18 os valores avaliados para t_Mut .

Tabela 17 - Relação de valores para a taxa de cruzamento

t_Cruz
10
25
50
90

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores apresentados nas Tabelas 17 e 18 foram combinados gerando um total de 32 conjuntos de parâmetros para realização dos experimentos, sendo 16 experimentos realizados sem o uso da política de intensificação e 16 com o uso desta política.

Tabela 18 - Relação de valores para a taxa de mutação

<i>t Mut</i>
5
15
25
50

Fonte: Elaborado pelo autor

Cada combinação de valores dos parâmetros foi empregada para solução dos problemas-teste definidos anteriormente, assumindo as quantidades de 25, 50 e 100 clientes, gerando um total de 96 experimentos, sendo cada experimento executado 40 vezes. Uma vez que os resultados obtidos com uso da política de intensificação foram superiores, estes serão os únicos a serem apresentados. A Tabela 19 apresenta os resultados dos experimentos para as instâncias com 25 clientes.

Tabela 19 - Resultados médios do Algoritmo Híbrido - 25 clientes

Instância	BT + Intensificação			Algoritmo Híbrido			Dif.
	DT	DP	PABT	DT	DP	PAAH	
C107	253,78	12,42	400 015	263,38	16,23	40 25	3,78%
R107	489,27	16,77	600 015	510,73	26,86	40 50	4,39%
RC107	329,87	33,12	200 075	365,47	64,28	25 50	10,79%
C207	305,53	12,33	400 400	311,24	13,35	50 15	1,87%
R207	547,40	4,88	200 050	548,65	7,06	90 05	0,23%
RC207	543,70	28,58	200 015	566,45	50,80	25 15	4,18%

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos resultados apresentados na Tabela 19, observa-se que a aplicação da Busca Tabu com a política de intensificação forneceu resultados superiores aos do Algoritmo Híbrido. Isto se deve à pequena dimensão do problema-teste avaliado e às características superiores que a Busca Tabu apresenta ao realizar o processo de intensificação do espaço de busca. Cada execução para uma instância de 25 clientes consumiu, em média, 38 segundos. A Tabela 20 apresenta os resultados dos experimentos para as instâncias com 50 clientes.

Tabela 20 - Resultados médios do Algoritmo Híbrido - 50 clientes

Instância	BT + Intensificação			Algoritmo Híbrido			Dif.
	DT	DP	PABT	DT	DP	PAAH	
C107	527,12	38,52	600 100	520,00	42,05	90 25	-1,35%
R107	853,71	39,79	600 100	839,62	47,93	50 25	-1,65%
RC107	866,56	99,07	400 015	866,09	87,33	90 50	-0,05%
C207	642,48	76,77	200 015	631,19	48,12	25 25	-1,76%

R207	752,84	38,39	600 025	741,92	45,62	50 50	-1,45%
RC207	987,31	127,84	400 025	970,01	136,99	50 25	-1,75%

Fonte: Elaborado pelo autor

Diferentemente dos resultados obtidos para a instância de 25 clientes, o Algoritmo Híbrido apresentou resultados promissores para a instância de 50 clientes, conforme pode ser observado a partir dos resultados apresentados na Tabela 20. Em todas as instâncias avaliadas houve melhora da medida DT, tendo sido identificados os valores 50 e 25 como os mais adequados para os parâmetros t_Cruz e t_Mut , respectivamente. Para as instâncias de 50 clientes, cada execução do Algoritmo Híbrido consumiu, em média, 87 segundos. A Tabela 21 apresenta os resultados dos experimentos para as instâncias com 100 clientes.

Tabela 21 - Resultados médios do Algoritmo Híbrido - 100 clientes

Instância	BT + Intensificação			Algoritmo Híbrido			Dif.
	DT	DP	PABT	DT	DP	PAAH	
C107	1334,92	106,80	600 015	1328,14	127,74	90 25	-0,51%
R107	1448,84	61,10	600 200	1438,23	68,02	50 25	-0,73%
RC107	1662,19	73,16	600 015	1670,14	64,05	90 50	0,48%
C207	1407,54	203,26	600 400	1308,55	268,51	25 25	-7,03%
R207	1288,42	117,37	600 200	1184,54	88,84	50 50	-8,06%
RC207	1638,09	119,42	600 025	1602,51	108,49	50 25	-2,17%

Fonte: Elaborado pelo autor

Similar aos resultados obtidos para a instância com 50 clientes, o Algoritmo Híbrido também apresenta resultados promissores para a instância com 100 clientes, conforme pode ser observado a partir dos resultados apresentados na Tabela 21. Com exceção da instância RC107, para todas as demais o Algoritmo Híbrido forneceu melhores resultados para a medida DT, tendo sido identificados os valores 50 e 25 como os mais adequados para os parâmetros t_Cruz e t_Mut , respectivamente. Cada execução para uma instância de 100 clientes consumiu, em média, 235 segundos.

A Tabela 22 apresenta os melhores valores de t_Cruz e t_Mut definidos para as instâncias de 25, 50 e 100 clientes, quando aplicado o Algoritmo Híbrido.

Tabela 22 - Parâmetros de sintonia do Algoritmo Híbrido

Clientes	t_Cruz	t_Mut
≤ 25	-	-
26 – 74	50	25

≥ 75	50	25
------	----	----

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores apresentados na Tabela 22 serão utilizados nos experimentos com instâncias reais, de acordo com a quantidade de clientes presentes na situação avaliada.

A partir dos resultados obtidos nos experimentos realizados com instâncias da literatura de diferentes tamanhos, é possível destacar a superioridade do Algoritmo Híbrido para os casos com mais de 50 clientes. Por outro lado, para instâncias menores, de até 25 clientes, a aplicação da Busca Tabu com intensificação mostrou-se mais indicada.

3.1.2 Validação do Algoritmo

Em virtude do Algoritmo Híbrido (AH) ter apresentado melhor desempenho médio que a Busca Tabu (BT) com intensificação, a Tabela 23 reúne os melhores resultados encontrados com o emprego do AH no conjunto de experimentos realizados para cada problema-teste. São apresentados os valores obtidos para as medidas DT (distância total) e NV (número de veículos), e os compara com os valores ótimos publicados pelos autores relacionados na Tabela 7.

Tabela 23 - Melhor resultado fornecido pelo Algoritmo Híbrido

Instância	Algoritmo Híbrido (AH)		Ótimo		GAP		
	DT	NV	DT	NV	DT	NV	
25	C107	224,7	3	191,3	3	17,46%	0,00%
	R107	437,4	4	424,3	4	3,09%	0,00%
	RC107	298,9	3	298,3	3	0,20%	0,00%
	C207	289,0	1	214,5	2	34,73%	-50,00%
	R207	521,4	1	361,6	3	44,19%	-66,67%
	RC207	493,3	1	298,3	3	65,37%	-66,67%
50	C107	410,15	5	362,4	5	13,18%	0,00%
	R107	784,38	6	711,1	7	10,31%	-14,29%
	RC107	645,6	6	642,7	6	0,45%	0,00%
	C207	535,3	2	359,6	3	48,86%	-33,33%
	R207	642,7	2	*	*	- x-	- x-
	RC207	738,4	2	558,6	4	32,19%	-50,00%
100	C107	1072,8	11	827,3	10	29,67%	10,00%
	R107	1464,7	10	1064,6	11	37,58%	-9,09%
	RC107	1485,9	12	1207,8	12	23,03%	0,00%
	C207	699,7	3	585,8	3	19,44%	0,00%
	R207	1006,2	3	893,33	2	12,63%	50,00%

RC207	1374,1	3	1061,14	3	29,49%	0,00%
-------	--------	---	---------	---	--------	-------

Fonte: Elaborado pelo autor. Obs: * indica casos para os quais não se conhece a solução ótima.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 23, destaca-se que os melhores resultados fornecidos pelo AH apresentaram redução no número de veículos (NV) em relação aos valores publicados na literatura (Tabela 7). No quesito NV, cabe ressaltar a importância para as empresas de transporte a redução do número de veículos em utilização, o que contribui para a redução dos custos operacionais. Para o conjunto de instâncias com 25 e 50 clientes, o AH apresentou, em 50% dos casos, uma redução no valor de NV, sendo observado os maiores ganhos nas instâncias C207, R207, RC207 para o caso de 25 clientes, e na instância RC207 para o caso de 50 clientes. Essa característica deve-se a uma forte política de intensificação em conjunto com um mecanismo de diversificação, adotado pelo AH, guiados pelas ponderações previamente definidas por meio dos parâmetros de peso de cada um dos fatores da FO (Tabela 6). Deve-se também observar que para os casos das instâncias RC107 com 25 e 50 clientes, o AH não reduziu o valor de NV, porém foi obtida uma solução que apresentou os valores de DT muito próximos daqueles indicados pelas soluções ótimas apresentadas na literatura de referência (Tabela 7).

3.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS CONSIDERANDO CASOS REAIS

O algoritmo híbrido foi avaliado em um cenário real de coletas e entregas realizadas em municípios da região da Serra, Vale do Caí, Produção e Nordeste do estado do Rio Grande do Sul, atendidos pela filial da Transportadora localizada no município de Farroupilha.

A instância real utilizada nos experimentos compreende um total de 577 clientes, entre coletas e entregas (eventos), distribuídos em 14 municípios da Serra, 11 municípios do Vale do Caí, 3 municípios da Produção e 6 municípios do Nordeste. Os eventos que compõem a instância foram coletados de um típico dia de trabalho da filial.

A empresa Transportadora adota a política de agrupamento dos eventos por regiões, definidas de acordo com a proximidade do Código de Endereçamento Postal dos Correios (CEP).

No processo de construção das rotas, o algoritmo levou em consideração, além das restrições já definidas na Seção 2.2.1.1, também outras restrições relacionadas ao ambiente real de operação da Transportadora. As restrições adicionais a serem consideradas nos experimentos com o cenário real referem-se ao volume total disponível no veículo e a extensão da obrigatoriedade da chegada ao cliente dentro da janela de atendimento do cliente, onde não será permitida a chegada antecipada, comumente desprezada nas instâncias da literatura. Além destas restrições adicionais, também foi considerada a inclusão de um intervalo de almoço na jornada de trabalho da tripulação.

Conforme feito na Seção 2.2.1.1, para a implementação computacional da solução, estas restrições serão relaxadas e consideradas na forma de penalização por meio da inserção dos termos correspondentes na função objetivo. Por esta razão, o novo formato da função objetivo empregada nos experimentos com o cenário real assume a seguinte forma:

$$FO_{real} = FO + P_{Ja} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} \max\{0, (a_j - T_j^k)\} + P_V \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} (V_i^k - \min\{V_k, V_k + v_i\}), \quad (14)$$

onde a primeira parcela, FO , representa a função objetivo dada pela equação (13); a segunda parcela representa a penalização pela chegada antecipada a um cliente; ponderada pelo parâmetro P_{Ja} , e a terceira parcela representa a penalização pela violação da capacidade de volume do veículo, ponderada pelo parâmetro P_V .

Além das restrições consideradas acima, o cenário real também define a possibilidade de parada do veículo para intervalo de almoço. Caso seja considerada esta possibilidade de ocorrência do intervalo de almoço, será incrementado o tempo correspondente à jornada do veículo.

O conjunto de clientes que compõem o cenário real assumido para realização dos experimentos foi dividido em 18 regiões, conforme a política de agrupamento adotada pela empresa, sendo cada região composta por um número variável de

clientes a serem atendidos de acordo com os eventos previstos em cada dia. Na Tabela 24, é apresentada a distribuição dos eventos em cada uma das regiões definidas pela empresa, para a instância real avaliada nos experimentos.

Tabela 24 – Quantidade de eventos por região

Região	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Nº Eventos	67	19	10	31	09	38	08	03	89	34	26	35	41	26	22	25	59	35

Fonte: Elaborado pelo autor

As informações referentes à distância e ao tempo de deslocamento entre clientes foram obtidas por meio do uso da ferramenta Google Maps (2018). Por exemplo, para um caso envolvendo 100 clientes, o tempo médio necessário para obtenção das distâncias entre os clientes é de aproximadamente 2 minutos. Adicionalmente, os parâmetros relativos à quantidade e à capacidade dos veículos disponíveis na filial foram obtidos por meio da ferramenta ERP utilizada pela empresa. Da mesma forma, dados relativos ao tipo de serviço demandado pelo cliente (coleta ou entrega), e o correspondente tempo de operação, também foram obtidos por meio da ferramenta ERP da empresa.

Para execução dos experimentos, os parâmetros do algoritmo híbrido foram definidos conforme Tabela 25.

Tabela 25 – Valores dos parâmetros nos experimentos reais

Parâmetro		Valor
<i>n_Viz</i>	Nº de vizinhos	Tabela 16
<i>tamTabu</i>	Tamanho da Lista Tabu	
<i>t_Cruz</i>	Taxa de cruzamento	Tabela 22
<i>t_Mut</i>	Taxa de mutação	
<i>SM_AG</i>	Aciona AG após nº max iterações sem melhorar FO	300
<i>IterIBL</i>	Aciona intensificação após nº max iterações sem melhorar FO	200
<i>BTmax</i>	Nº máximo de iterações sem melhorar FO	5000
<i>n_elite</i>	Tamanho da lista de Soluções Elite	10
<i>AGmax</i>	Nº máximo de gerações	500
<i>tamPop</i>	Tamanho da população	1000

Fonte: Elaborado pelo autor

O conjunto de experimentos com a instância real é composto por quatro diferentes cenários, conforme apresentado na Tabela 26. Os diferentes cenários são definidos de acordo com a adoção ou não da política de agrupamento de clientes, mencionada anteriormente, e a adoção ou não da janela de coletas. A política de

definição da janela de coletas determina que todos os eventos de coleta sejam executados no período da tarde. Esta política é adotada pela Transportadora com o objetivo de evitar o não atendimento da demanda do cliente por falta de espaço no veículo.

Tabela 26 – Conjunto de cenários avaliados nos experimentos com casos reais

Cenários	Descrição
CD-CJ	Adota divisões e janela de coletas
CD-SJ	Adota divisões e não adota janela de coletas
SD-CJ	Não adota divisões e adota janela de coletas
SD-SJ	Não adota divisões e não adota janela de coletas

Fonte: Elaborado pelo autor

a) Cenário CD-CJ: Este cenário diz respeito ao uso das políticas de divisão e janela de coleta adotadas pela empresa. A Tabela 27 apresenta os resultados obtidos pelo algoritmo e os compara com aqueles obtidos pelo método atualmente utilizado pela empresa. São apresentados os valores da distância total (DT) e do número de veículos (NV) para cada uma das regiões avaliadas. Para cada região, o algoritmo híbrido (AH) foi executado 30 vezes sendo apresentados na tabela os resultados correspondentes ao menor e ao maior valor de DT encontrado e o respectivo valor de NV. Observa-se que para todas regiões, o AH apresentou resultado superior ao método atualmente utilizado pela empresa, tendo sido alcançado um valor médio para o ganho na medida DT de 34,9%. Entre os resultados obtidos, observam-se melhorias acima da média em 10 das 18 regiões avaliadas, com destaque para a região 12 para a qual foi obtido um ganho de 52%.

Tabela 27 – Resultados do AH no cenário CD-CJ

REGIÃO	MANUAL		ROTEIRIZADOR					
	DT	NV	Menor DT	NV	Ganho	Maior DT	NV	Ganho
1	421.297	2	249.797	2	40,7%	291.110	2	30,9%
2	279.293	1	158.751	1	43,2%	160.269	1	42,6%
3	514.240	1	376.127	1	26,9%	376.127	1	26,9%
4	251.936	1	180.060	1	28,5%	180.185	1	28,5%
5	519.351	1	441.310	1	15,0%	441.310	1	15,0%
6	853.519	2	595.871	2	30,2%	597.084	2	30,0%
7	102.957	1	93.209	1	9,5%	93.209	1	9,5%
8	227.288	1	211.384	1	7,0%	211.384	1	7,0%
9	362.102	3	188.119	3	48,0%	192.671	3	46,8%
10	127.676	1	72.335	1	43,3%	109.346	1	14,4%
11	64.403	1	36.779	1	42,9%	36.779	1	42,9%
12	753.239	2	361.377	2	52,0%	362.527	2	51,9%

13	599.156	2	356.010	2	40,6%	364.957	2	39,1%
14	147.210	1	95.355	1	35,2%	97.982	1	33,4%
15	228.470	1	165.136	1	27,7%	165.136	1	27,7%
16	131.490	1	77.164	1	41,3%	80.169	1	39,0%
17	446.235	2	253.454	2	43,2%	268.310	2	39,9%
18	125.378	1	93.999	1	25,0%	94.134	1	24,9%
TOTAL	6.155.240	25	4.006.237	25	34,9%	4.122.689	25	33,0%

Fonte: Elaborado pelo autor

b) Cenário CD-SJ: Este cenário diz respeito ao uso unicamente da política de divisão adotada pela empresa. A não adoção da política de janela de coletas neste cenário contraria uma prática comum de mercado no transporte rodoviário de cargas. Portanto, com a análise deste cenário, busca-se evidenciar a capacidade do AH em gerenciar melhor o processo conjunto de coletas e entregas. A Tabela 28 apresenta os resultados obtidos pelo algoritmo e, novamente, os compara com aqueles obtidos pelo método atualmente utilizado pela empresa. Mais uma vez, observa-se que o AH apresentou resultado superior ao método atualmente utilizado pela empresa em todas as regiões. Sem a adoção da política de janelas de coleta atualmente adotada pela empresa, foram alcançados resultados ainda melhores que no cenário anteriormente avaliado. O emprego do AH gerou um valor médio para o ganho na medida DT de 37,3%, tendo sido observadas melhorias acima da média em 11 das 18 regiões avaliadas, com destaque novamente para a região 12 para a qual foi obtido um ganho acima de 55%.

Tabela 28 - Resultados do AH no cenário CD-SJ

REGIÃO	MANUAL		ROTEIRIZADOR					
	DT	NV	Menor DT	NV	Ganho	Maior DT	NV	Ganho
1	421.297	2	244.953	2	41,9%	250.245	2	40,6%
2	279.293	1	153.924	1	44,9%	153.924	1	44,9%
3	514.240	1	376.127	1	26,9%	376.127	1	26,9%
4	251.936	1	163.145	1	35,2%	163.219	1	35,2%
5	519.351	1	441.310	1	15,0%	441.310	1	15,0%
6	853.519	2	517.847	2	39,3%	596.301	2	30,1%
7	102.957	1	93.209	1	9,5%	93.209	1	9,5%
8	227.288	1	211.384	1	7,0%	211.384	1	7,0%
9	362.102	3	187.144	3	48,3%	190.427	3	47,4%
10	127.676	1	71.170	1	44,3%	72.421	1	43,3%
11	64.403	1	36.779	1	42,9%	36.779	1	42,9%
12	753.239	2	337.143	2	55,2%	360.623	2	52,1%
13	599.156	2	354.341	2	40,9%	362.248	2	39,5%
14	147.210	1	90.730	1	38,4%	91.466	1	37,9%
15	228.470	1	164.600	1	28,0%	164.909	1	27,8%
16	131.490	1	77.164	1	41,3%	78.089	1	40,6%

17	446.235	2	247.342	2	44,6%	256.114	2	42,6%
18	125.378	1	93.519	1	25,4%	94.134	1	24,9%
TOTAL	6.155.240	25	3.861.831	25	37,3%	3.992.929	25	35,1%

Fonte: Elaborado pelo autor

c) Cenário SD-CJ: Este cenário diz respeito ao uso unicamente da política de adoção da janela de coletas definida pela empresa. A não adoção da política de agrupamento de clientes em regiões permite ao AH identificar a melhor configuração de regiões para o dia específico de trabalho em análise. Empresas de TRC comumente adotam a prática de agrupamento de clientes em regiões, porém se não for feito por meio do uso de uma abordagem científica é preferível transferir esta tarefa para uma técnica de otimização empregada na roteirização. A Tabela 29 apresenta os resultados obtidos pelo algoritmo, onde se observa, novamente, uma redução na medida DT, superior a 41% e, adicionalmente, uma redução de 20% no valor de NV. Destaca-se que a aplicação do AH sem a política de agrupamento permitiu um ganho superior ao cenário CD-CJ apresentado anteriormente, com melhoria de 10% na medida DT e melhoria de 20% na medida NV.

Tabela 29 - Resultados do AH no cenário SD-CJ

TODAS REGIÕES	MANUAL		ROTEIRIZADOR		GANHO		TEMPO PROCESSAMENTO
	DT	NV	DT	NV	DT	NV	
COM JANELA	6.155.240	25	3.576.533	20	41,9%	20,0%	160 min

Fonte: Elaborado pelo autor

d) Cenário SD-SJ: Este cenário diz respeito ao uso do AH sem a adoção de políticas definidas pela empresa. Este cenário permite ao algoritmo definir livremente a melhor sequência de eventos de coleta e entrega e também a configuração de regiões para o dia específico de trabalho em análise. Não é comum nas empresas de TRC a utilização desta prática devido à complexidade no processo de roteirização manual. A Tabela 30 apresenta os resultados obtidos pelo AH, onde observa-se novamente uma redução na medida DT, próxima a 49% e uma redução de 24% no valor de NV em comparação ao processo manual. O ganho obtido neste cenário é superior a todos anteriormente avaliados, tanto em distância total percorrida (DT) quanto em número de veículos empregados (NV), sendo 18% superior na medida DT e 24% na medida NV quando comparado ao cenário CD-SJ, e de 12% superior na medida DT e 5% superior na medida NV quando comparado ao cenário SD-CJ.

Tabela 30 - Resultados do AH no cenário SD-SJ

TODAS REGIÕES	MANUAL		ROTEIRIZADOR		GANHO		TEMPO
	DT	NV	DT	NV	DT	NV	
SEM JANELA	6.155.240	25	3.145.162	19	48,9%	24,0%	138 min

Fonte: Elaborado pelo autor

Em todos cenários, observa-se ganho em relação ao processo de roteirização manual atualmente em uso pela Transportadora, o que justificaria sua automatização através do emprego do AH com o objetivo de roteirizar um número maior de eventos sem elevar a distância total percorrida e o número de veículos utilizados. Dentre os cenários avaliados, o cenário CD-SJ apresenta as melhores características para implementação do AH na Transportadora devido a preservar unicamente a política de agrupamento por regiões. Apesar dos ganhos superiores apresentados nos cenários SD, tanto na distância total percorrida (DT) quanto no número de veículos utilizados (NV), a eliminação da política de agrupamento implicaria na remodelagem da gestão de operação de todos os depósitos da Transportadora.

Para realizar os 577 eventos, segundo o roteiro determinado pelo processo manual empregado na Transportadora, foram percorridos 6.155 quilômetros a um custo de R\$ 9.97 por evento (custo referente a março/2018, fornecido pela empresa), gerando ao final do dia um custo total de R\$ 5.752,69. De acordo com a empresa, o custo por evento é formado por inúmeros fatores, dentre os quais destacam-se o custo com combustível, o custo com pneus, o custo com lubrificantes, o custo com manutenção do veículo e o custo com a tripulação. Destes fatores, o custo com combustível representa mais de 60% do custo por evento.

Comparando o resultado obtido pelo AH no cenário CD-SJ com o resultado da roteirização manual, obteve-se uma diferença (ganho) de 2.293 quilômetros, o que possibilitaria à Transportadora realizar um adicional de 342 eventos, totalizando assim 919 eventos no dia em questão. A distância média percorrida por evento reflete diretamente no consumo de combustível, sendo que a redução média da distância por evento contribui diretamente para a redução do custo evento. Neste caso, estima-se uma redução de aproximadamente 37% no custo por evento, o que representa uma economia de R\$ 3,71. Para a instância real em análise, esta economia representaria um ganho aproximado de R\$ 2.140 ao dia. Assumindo uma operação mensal de 22 dias, a economia atingida seria de R\$ 47.080 o que resultaria em uma economia anual aproximada de R\$ 564.960, para a filial em estudo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O PRV é amplamente estudado por inúmeros autores que, por meio de suas pesquisas, vêm propondo diferentes estratégias de solução para as diversas variantes do problema, demonstrando, deste modo, a sua importância e relevância na comunidade científica. Grande parte desta atenção dedicada ao tema é reflexo da dependência do setor privado por melhores resultados logísticos, uma vez que os gastos com transporte podem representar até dois terços dos custos.

O problema enfrentado pela Transportadora exige o sequenciamento de eventos, tanto de coleta como de entrega, e deve considerar que a capacidade do veículo não seja excedida durante o percurso, além de respeitar, quando definido pelos clientes, o horário de chegada e partida, bem como o intervalo para almoço da tripulação e o horário de sua jornada de trabalho. Atualmente, o atendimento dessas condições depende diretamente da habilidade e conhecimento do roteirista, profissional este encarregado pelo sequenciamento das coletas e entregas das regiões atendidas pelas diferentes unidades da Transportadora, resultando, de acordo com a empresa, em um processo oneroso e empírico. Por ser um problema de complexidade NP-difícil, a maior parcela dos estudos e publicações propõem heurísticas e metaheurísticas para resolvê-lo.

O estudo em questão propõe o emprego de um algoritmo híbrido (AH) composto pelas metaheurísticas Busca Tabu e Algoritmo Genético para solução do problema de roteamento de veículos da Transportadora, assumindo a realização de eventos de coleta e entrega e restrições de janela de tempo (PRVCEJT). Além das características do PRVCEJT, foram também consideradas restrições relativas ao horário de jornada e ao intervalo de almoço da tripulação. O AH permite combinar as melhores características das técnicas empregadas, isto é, a capacidade de intensificação da Busca Tabu, juntamente com a capacidade de diversificação do Algoritmo Genético. Os resultados obtidos pelo emprego do AH demonstraram superioridade quando comparados à aplicação de cada técnica individualmente, o que justifica sua aplicação.

Conforme observado no fluxo do processo do AH, apresentado na Figura 22, no Capítulo 2, a estratégia híbrida de otimização foi dividida em quatro etapas: i) Inicializar; ii) Gerar solução inicial; iii) Gerar soluções vizinhas; e iv) Diversificação.

A primeira etapa contempla a inicialização das variáveis, lista de clientes e respectivas demandas, construção das matrizes de distância e tempo de deslocamento, estruturas de memória e os parâmetros empregados nas heurísticas de melhoramento (HM). O conjunto de HM é formado por seis estruturas de vizinhança: *swap intra-route*, *swap inter-route*, *2-opt*, *shift request*, *rearrange request* e *two optimal insertion*. O emprego deste conjunto de estruturas de vizinhança foi o que possibilitou ao AH a obtenção de soluções de qualidade superior.

A segunda etapa gera a solução inicial (SO) através do emprego da técnica do vizinho mais próximo. A SO contém a primeira sequência de eventos e apresenta um determinado custo fornecido por meio do cálculo da função objetivo (FO). A partir da SO gerada, a terceira etapa intensifica a busca no espaço de soluções por meio do emprego das HM, com o objetivo de encontrar soluções que apresentem um valor de FO cada vez menor. Após um determinado número de interações neste processo de intensificação, sem haver melhoria das soluções geradas, inicia-se a quarta etapa. A etapa de diversificação tem o objetivo de conduzir a busca para regiões do espaço de soluções ainda inexploradas, com o intuito de identificar novas regiões promissoras.

Com o objetivo de sintonizar os parâmetros do AH, os experimentos iniciais foram realizados considerando problemas teste clássicos da literatura, apresentados por Solomon (1987). Dos dez parâmetros empregados no AH, apenas quatro (*n_Viz*, *tamTabu*, *t_Cruz* e *t_Mut*) foram considerados nos experimentos de ajuste, permanecendo fixos os demais. Em 50% dos experimentos realizados (Tabela 23), o AH forneceu resultados superiores ou muito próximos dos valores de distância percorrida ou número de veículos apresentados pela literatura.

A Transportadora entende como vantagem em relação a concorrentes a automação de processos através da informatização e, com base nisso, optou pelo desenvolvimento de um software para roteirização. O AH foi aplicado por meio deste software, denominado de Roteirizador, no ambiente computacional da empresa. O Roteirizador foi integrado ao sistema de ERP e ao sistema de mobilidade utilizado

para gestão da frota, tornando-se, deste modo, parte do processo de geração dos roteiros. Uma vez que o acesso ao Roteirizador é realizado via web, isso possibilita sua utilização de maneira simples pelos roteiristas alocados nas unidades da Transportadora, o que permite ao profissional delegar ao Roteirizador a tarefa operacional de encontrar as melhores rotas para as regiões atendidas por cada filial. Caberá ao roteirista a tarefa de analisar a solução apresentada pelo Roteirizador. Além de o software executar a tarefa operacional, permitindo ao roteirista a realização de outras atividades, ao final do processo, o software também fornecerá um conjunto consistente de informações que suportam a tomada de decisão.

Nos experimentos executados na unidade de Farroupilha da Transportadora, todos os cenários apresentaram ganho em relação ao processo manual atualmente executado pelo roteirista. Mantendo a política de agrupamento em regiões, o Roteirizador apresentou a possibilidade de economizar mais de R\$ 500 mil ao ano, unicamente com a redução da distância percorrida pelos veículos. Além do ganho em distância, o correto dimensionamento da jornada de trabalho das tripulações eliminou a necessidade de horas extras. Entretanto, deve ser observado que cabe ainda a possibilidade de ganho superior em distância, e também no número de veículos empregados, caso a política de agrupamento de clientes por regiões seja revista. Neste contexto, os veículos não utilizados poderiam atender a demanda excedente, ou regiões com exigências maiores de cumprimento de prazo ou ainda permitir a designação de veículos dedicados a clientes estratégicos. Adicionalmente, os experimentos em questão representam a movimentação normal de um único dia em uma das 66 unidades da Transportadora, o que sugere a possibilidade de ganho financeiro superior quando o Roteirizador for utilizado por todas as unidades.

Com base no que foi apresentado, as seguintes contribuições acadêmicas do presente trabalho podem ser destacadas: (i) modificação da metaheurística Busca Tabu canônica pelo emprego concomitante de seis heurísticas de melhoramento; (ii) modificação da metaheurística Busca Tabu canônica pelo emprego de uma política de intensificação no processo de geração de soluções vizinhas; (iii) aplicação combinada das metaheurísticas Busca Tabu e Algoritmo Genético de modo a explorar as melhores características de busca de cada uma por meio das sintonias dos parâmetros. Adicionalmente, as seguintes contribuições práticas do presente trabalho podem ser destacadas: (i) ferramenta integrada ao ambiente computacional da

Transportadora que auxilia na elaboração de roteiros de coleta e entrega; (ii) simplificação do processo de roteirização, gerando redução do tempo necessário para sua execução; (iii) ganhos decorrentes da redução da distância total percorrida, do melhor aproveitamento dos veículos empregados, da redução do número de horas extras e da pontualidade na realização dos eventos.

Como trabalhos futuros, sugere-se estender a etapa de sintonia tornando ajustáveis também os parâmetros aqui assumidos fixos. Os experimentos demonstraram que o uso de uma vizinhança diversificada apresenta resultados de maior qualidade. Neste sentido, o ajuste dos demais parâmetros tem como objetivo ampliar a exploração do espaço de soluções em busca de regiões ainda não exploradas. Além dos parâmetros do AH, sugere-se também a realização de um estudo mais detalhado relacionado ao ajuste dos valores dos fatores de ponderação da FO, com o objetivo de melhorar a condução da exploração no espaço de soluções. Adicionalmente, também observa-se a oportunidade de abordar outras características do problema, como a frota heterogênea, múltiplos depósitos, restrições de veículos por cliente e tipo de percurso, tornando, assim, o trabalho mais aderente à realidade da Transportadora.

REFERÊNCIAS

- AI, T.J.; KACHITVICHYANUKUL, V. A particle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. **Computers & Operations Research**. Elsevier, 2009a.
- AI, T.J.; KACHITVICHYANUKUL, V. A particle swarm optimization for vehicle routing problem with time windows. **International Journal of Engineering Science**. Elsevier, 2009b.
- ANBUUDAYASANKAR, S. P., GANESH, K., LENNY KOH, S. C., DUCQ, Y. Modified savings heuristics and genetic algorithm for bi-objective vehicle routing problem with forced backhauls. **Expert Systems with Applications**, 39(3), 2296–2305. 2012.
- ARAÚJO, J. G. Transporte rodoviário de cargas no Brasil mercado atual e próximas tendências. **ILOS**, Rio de Janeiro, jan. 2011. Seção para empresas. Disponível em: <<http://www.ilos.com.br/web/transporte-rodoviario-de-cargas-no-brasil-mercado-atual-e-proximas-tendencias/>>. Acesso em: 15 dez. 2016.
- ARAÚJO, R. R. **Um Modelo de Resolução para o Problema de Roteirização em Arcos com Restrição de Capacidade**. 2003. 177 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Porto Alegre, 2003.
- ARCHETTI, C.; BERTAZZI, L.; LAPORTE, G.; SPERANZA, M. G. A Branch-and-Cut Algorithm for a Vendor-Managed Inventory-Routing Problem. **Transportation Science**, v.41, p. 382–391, 2007.
- ARRUDA JUNIOR; J. DA S. **Desenvolvimento De Um Método Para Redução Do Consumo De Combustível No Transporte Rodoviário De Cargas. Capacitação, Aplicações De Torque E Telemetria Para Veículos Pesados**. 2014. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2014.
- BAKER, B. M.; AYECHIEW, M. A. A genetic algorithm for the vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, v. 30, p. 787-800, 2003.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos – Planejamento, Organização e Logística Empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- BANCO MUNDIAL. **The World Bank**. Disponível em: <http://lpi.worldbank.org/sites/default/files/International_LPI_from_2007_to_2016.xlsx>. Acesso em: 28 dez. 2016.
- BAÑOS, R.; ORTEGA, J.; GIL, C.; FERNÁNDEZ, A.; DE TORO, F. A simulated annealing-based parallel multi-objective approach to vehicle routing problems with time windows. **Expert Systems with Applications**, 40(5), 1696–1707, 2013.
- BANZHAF, W; NORDIN, P.; KELLER, R. E. & FRANCONI, F. D. Genetic Programming: an introduction. **Morgan Kaufmann**, 1998.

BELHAIZA, S.; HANSEN, P.; LAPORTE, G. A hybrid variable neighborhood tabu search heuristic for the vehicle routing problem with multiple time windows. **Computers & Operations Research**, 52, 269–281, 2014.

BENT, R.; HENTENRYCK, P. V., **A Two-Stage Hybrid Local Search for the Vehicle Routing Problem with Time Windows**. Technical Report CS-01-06, Department of Computer Science, Brown University, 2001.

BODIN, L.D.; GOLDEN, B.L.; ASSAD, A.A.; BALL, M.O. Routing and Scheduling of vehicles and crews: The State of the Art. **Computers and Operations Research**. v.10, p.69-211, 1983.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logística empresarial: o processamento de integração da cadeia de suprimento**. São Paulo: Atlas, 2001.

BRANDÃO, J. A tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, 38(1), 140–151, 2011.

BRÄYSY, O.; GENDREAU, M. Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms. **Transportation Science**, v. 39, p. 104–118, 2005.

BREEDAM, A. V. Improvement heuristics for the Vehicle routing Problem based on Simulated Annealing. **European Journal of Operational Research**, v.86, p.480-490, 1995.

CAIXETA FILHO, J. V.; MARTINS, R. S. **Gestão Logística do Transporte de Cargas**. São Paulo: Atlas, 2000.

CATTARUZZA, D.; ABSI, N.; FEILLET, D.; VIGO, D. An iterated local search for the multi-commodity multi-trip vehicle routing problem with time windows. **Computers & Operations Research**. Elsevier, 2014.

CHABRIER, A. Vehicle Routing Problem with Elementary Shortest Path based Column Generation. Forthcoming in: *Computers and Operations Research*, 2005.

CHENG, C. B.; Wang, K. P. Solving a vehicle routing problem with time windows by a decomposition technique and a genetic algorithm. **Expert Systems with Applications**, 36(4), 7758–7763, 2009.

CHRISTOFIDES, N. Uses of a vehicle routing and scheduling system in strategic distribution planning. **Scandinavian Journal of Mat Admin**, v. 7, n. 2, p. 39-55, 1981.

CHRISTOFIDES, N.; ELION, S. An Algorithm for the vehicle Dispatching Problem. **Operational Research Quaterly**, v.20, n.3, 1969.

CLARKE, G.; WRIGHT, J. W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. **Operations Research**, v.12, p.568-581, 1964.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. **Boletim Estatístico**. Brasília 2017. Disponível em: < <http://www.cnt.org.br/Boletim/boletim-estatistico-cnt>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

COELHO, H. B. G. G. P.; MOURA, L. S. DE; SOARES, M. E. S.; HIRLE, A. L. C. Estudo de viabilidade da terceirização logística em almoxarifados centrais do poder executivo do estado de Minas Gerais. **Congresso CONSAD de Gestão Pública**, v. 8, Brasília, mai. 2015. Disponível em: <<http://banco.consad.org.br/handle/123456789/1247>>. Acesso em: 29 dez. 2016.

CORDEAU, J. F. A branch-and-cut algorithm for the dial-a-ride problem. **Operations Research**, v. 54, n. 3, p. 573–586, 2006.

CORDEAU, J. F.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; POTVIN, J. Y.; SEMET, F. A guide to vehicle routing heuristics. **Journal of the Operational Research Society**. v. 53, p. 512-522, 2002.

CORDEAU, J. F., Maischberger, M. A parallel iterated tabu search heuristic for vehicle routing problems. **Computers & Operations Research**, 39(9), 2033–2050, 2012.

CORREIOS. Empresa Brasileira de Correios e Telégrafos. O que é CEP e porque usá-lo. Brasília, jan.2018. Disponível em: <<https://www.correios.com.br/para-voce/precisa-de-ajuda/o-que-e-cep-e-por-que-usa-lo>>. Acesso em: 14 jan. 2018

COSTA, L. O. O papel do transporte na logística de distribuição: um estudo de caso sobre uma empresa de torrefação e moagem em Eusébio – Ceará. **Revista Gestão em Análise**, v. 4, n. 2, p. 119-128, Fortaleza, 2015.

COOK, W. RICH, J. A parallel cutting plane algorithm for the vehicle routing problem with time Windows. Computational and Applied Mathematics. Rice University, Houston, 1999.

CUNHA, C. B. Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. **Revista Transportes da ANPET**, v. 8, n. 2, p. 51-74, 2000.

D'AGOSTO, M. Qual é o modelo de transporte que queremos para o futuro? **Revista Tecnológica OnLine**, São Paulo, out. 2016. Disponível em: <<http://www.tecnologica.com.br/portal/artigos/73330/qual-e-o-modelo-de-transporte-que-queremos-para-o-futuro/>>. Acesso em: 13 dez. 2016.

DERIGS, U.; PULLMANN, M.; Vogel, U. A short note on applying a simple LS/LNS-based metaheuristic to the rollon–rolloff vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, 40(3), 867–872, 2013.

DRIDI, I. H.; KAMMARTI; R, KSOURI; M., BORNE P. A Genetic Algorithm for the MultiPickup and Delivery Problem with time windows. **Information Control Problems in Manufacturing**, v.13, p.1-17, 2010.

EDMUND K. B., GRAHAM K. **Search Methodologies - Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques**. Springer Science+Business Media New York, v.2, p.176, 2014. Doi: 10.1007/978-1-4614-6940-7

FISHER, M. L., JAIKUMAR, R. **A generalized assignment heuristic for vehicle routing**. *Networks*, v.11, p.109-124, 1981.

GENDREAU, M., HERTZ, A., LAPORTE, G. **A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem**. *Management Science* v.40, p.1276-1290, 1994.

GENDREAU, M., POTVIN, J. **Handbook of Metaheuristics**. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, v.146, p.669, 2010.DOI 10.1007/978-1-4419-1665-5

GHOSEIRI, K.; GHANNADPOUR; S. F. **Multi-objective vehicle routing problem with time windows using goal programming and genetic algorithm**. *Applied Soft Computing*, 10(4), 1096–1107, 2010.

GIL, Antonio C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6º ed., V.1, São Paulo: Atlas, 2008.

GILLET, B. E.; MILLER; L. R. **A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem**. *Operations Research*, v.22, p.240-349, 1974.

GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A., **Handbook of Metaheuristics**. Kluwer Academic Publishers, 2003.

GLOVER, F.; LAGUNA, M. **Tabu Search**. Springer Science+Business Media New York Originally published by Kluwer Academic Publishers, 1997.

GOKSAL, FP; KARAOGLAN, I; ALTIPARMAK, F. A hybrid discrete particle swarm optimization for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. **Computers & Industrial Engineering**. Elsevier, 2013.

GOLDBERG D.E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. **Addison-wesley Publishing Company**. The University of Alabama, Alabama, 1989.

GOLDBERG D.E.; LINGLE R. **Alleles, Loci, and the TSP. Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms**. IJssdale, NJ, p.154-159, 1985.

GOOGLE ACADÊMICO. **Aplicativo de pesquisa**. Disponível em: <<https://scholar.google.com.br/>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

GOOGLE MAPS. **Aplicativo de mapas**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

HESKETT, L. J. Controlling Customer Logistics Service. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 24, n. 4, p. 4-10, 1994.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1975.

HONG, L. An improved LNS algorithm for real-time vehicle routing problem with time windows. **Computers & Operations Research**, 39(2), 151–163, 2012

Irnich, S., Villeneuve, D. The shortest path problem with k-cycle elimination ($k \geq 3$): Improving a branch-and-price algorithm for the VRPTW. Forthcoming in: **INFORMS Journal of Computing**, 2005.

IORI, M. G.; J. J. S.; VIGO, D. An Exact Approach for the Vehicle Routing Problem with Two-Dimensional Loading Constraints. **Transportation Science**, v.41, p.253-264, 2007.

JIN, J.; Crainic; T. G.; LØKKETANGEN, A. A parallel multi-neighborhood cooperative tabu search for capacitated vehicle routing problems. **European Journal of Operational Research**, 222(3), 441–451, 2012.

KALLEHAUGE, B., LARSEN, J. MADSEN, O.B.G. Lagrangean duality and non-differentiable optimization applied on routing with time windows - experimental results. Internal report IMM-REP-2000-8. Department of Mathematical Modelling. Technical University of Denmark. Denmark, 2000.

KOHL, N., DESROSIERS, J., MADSEN, O. B. G., SOLOMON, M. M., SOUMIS, F. 2-Path Cuts for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. **Transportation Science**, v.33, p.101-116, 1999.

KUMAR, N.; BIDHAN, K.; KUMAR, R. A Comparative Analysis of PMX, CX and OX Crossover operators for solving Travelling Salesman Problem. **International Journal of Latest Research in Science and Technology**. Vol.1, Issue 2 :Page No.98-101, July-August, 2012.

KUO, R. J.; ZULVIA, F. E.; SURYADI, K. Hybrid particle swarm optimization with genetic algorithm for solving capacitated vehicle routing problem with fuzzy demand – A case study on garbage collection system. **Applied Mathematics and Computation**, 219(5), 2574–2588, 2012.

KUO, Y. Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem. **Computers & Industrial Engineering**, 59 (1), 157–165, 2010.

LAPORTE, G. Fifty Years of Vehicle Routing. **Transportation Science**. v43, p. 408–416, 2009.

LAPORTE, G. The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms. **European Journal of Operational Research**, v. 59, n. 2, p. 231-247, 1992.

LAPORTE, G. The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. **European Journal of operational Research** v.59, p.345-458, 1992a.

LAPORTE, G.; NOBERT, Y. A cutting planes algorithm for the m-salesman problem. **Journal of the Operational Research Society**, v.31, p.1017-1023, 1980.

LAPORTE, G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J.; SEMET, F. Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. **Intl. Trans. in Op. Res** v.7, p.285-300, 2000.

LARSEN, J. Parallelization of the vehicle routing problem with time windows. Ph.D. Thesis IMM-PHD-1999-62. Department of Mathematical Modelling. Technical University of Denmark, Denmark, 1999.

LI; PARDALOS, J.; SUN; H. Pei; J; Zhang, Y. Iterated local search embedded adaptive neighborhood selection approach for the multi-depot vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups. **Expert Systems with Applications**. Elsevier, 2015.

LI, H.; LIM, A. A Metaheuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. **Department of Computer Science**. National University of Singapore, 2003.

LI; X.; LEUNG, S. C. H.; TIAN, P. A multistart adaptive memory-based tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem. **Expert Systems with Applications**, 3, 2012.

LIMA, B. P.; MORAIS L. M.; NASCIMENTO, R. G. S.; MARTINS, P. H. L.; CARVALHO, L. C. Utilização Do Conceito Milk Run Para Redução Dos Custos Logísticos Em Uma Indústria Automobilística. **Cadernos UniFOA Especial Engenharia de Produção**, Volta Redonda, n. 2, p. 89-101, 2015.

LIN, S. Computer solution of the traveling salesman problem. **Bell System Technical Journal**. 44,2245-2269, 1965.

LIN, S.; WU, Y.; CHOU, S. Y. Solving the truck and trailer routing problem based on a simulated annealing heuristic. **Computers & Operations Research**, 36(5), 1683–1692, 2009.

LIU, S.; HUANG, W.; MA, H. An effective genetic algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problems. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 45(3), 434–445, 2009.

LU, C.; YU, V. F. Data envelopment analysis for evaluating the efficiency of genetic algorithms on solving the vehicle routing problem with soft time windows. **Computers & Industrial Engineering**, 63(2), 520–529, 2012.

MARINAKIS, Y. Multiple phase neighborhood search-GRASP for the capacitated vehicle routing problem. **Expert Systems with Applications**. Elsevier, 2012.

MARINAKIS, Y.; MIGDALAS, A. Heuristic Solutions of Vehicle Routing Problems in Supply Chain Management. *Combinatorial and Global Optimization*, P.M. Pardalos *et al.* (ed.s), **Scientific World**, p. 205-235, 2002.

MARINAKIS, Y; IORDANIDOU, GR; MARINAKI, M. Particle swarm optimization for the vehicle routing problem with stochastic demands. **Applied Soft Computing**. Elsevier, 2013.

MARINAKIS, Y; MARINAKI, M. A hybrid genetic–Particle Swarm Optimization Algorithm for the vehicle routing problem. **Expert Systems with Applications**. Elsevier, 2010.

MATESCO, H. Benefícios do roteirizador para o aumento da competitividade, **Revista Tecnológica OnLine**, São Paulo, ago. 2015. Disponível em: <<http://www.tecnologica.com.br/portal/artigos/72786/beneficios-do-roterizador-para-o-aumento-da-competitividade/>>. Acessado em: 18 dez. 2016.

MATTAR, Fauze N. **Pesquisa de Marketing: Metodologia e planejamento**. 5^o ed., V.1, São Paulo: Atlas, 1999.

MELO, A.C.S.; FERREIRA FILHO, V.J.M. Sistemas de roteirização e programação de veículos. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 223-232, 2001.

MESTER, D.; BRÄYSY, O. Active guided evolution strategies for large-scale vehicle routing problems with time windows. **Computers and Operations Research**, v. 32, n. 6, p. 1593-1614, 2005.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + data structures = evolution programs**. 2^o ed., V. 2, New York: Springer, 1999.

MICHALLET, J; PRINS, C; AMODEO, L; YALAOUI, F. Multi-start iterated local search for the periodic vehicle routing problem with time windows and time spread constraints on services. **Computers & operations**. Elsevier, 2014.

MITCHELL, M. An introduction to genetic algorithms. **Cambridge: Mit Press**. 1999.

MOLE, R. H.; JAMENSON, S. R. A sequential route-building algorithm employing a generalized savings criterion. **Journal Chemical and Physical**, v.27, p.503-511, 1976.

NAZIF, H.; LEE, L. S. Optimised crossover genetic algorithm for capacitated vehicle routing problem. **Applied Mathematical Modelling**, 36(5), 2110–2117, 2012.

NGUYEN, P. K.; CRAINIC, T. G.; TOULOUSE, M. A tabu search for timedependent multi-zone multi-trip vehicle routing problem with time windows. **European Journal of Operational Research**, 231(1), 43–56, 2013.

NOVAES, Antonio Galvão. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição: estratégia, operação e avaliação**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

PRINS, C. A GRASP_x evolutionary local search hybrid for the vehicle routing problem, Bio-inspired algorithms for the vehicle routing problem. **Springer**, 2009.

RALPH, T.K.; KOPMAN, L.; PULLEYBLANK, W.R.; TROTTER, L.E. On the Capacitated Vehicle Routing Problem. **Mathematical programming**, v.94, p.343-359, 2001.

REEVES, C. Genetic Algorithms. In: Glover, F., Kochenberger, G. A., Handbook of Metaheuristics. **Kluwer Academic Publishers**, 2003.

REGO, C. A subpath ejection method for the vehicle routing problem. **Management Science**, v.44, p.1447-1459, 1998.

REGO, C.; ROUCAIROL, C. **A parallel tabu search algorithm using ejection chains for the vehicle routing problem**. In: Osman I.H. and Kelly J.P (eds) **MetaHeuristics: Theory and Applications**. Kluwer:Boston, 661-675, 1996.

ROCHAT, Y., TAILLARD, E.D. **Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing**. Journal of Heuristics, v.1, p.147-167, 1995.

RODRIGUES, A. G.; HOFFMANN, T. L.; GÓMES, A. T. **Estudo da performance da pesquisa tabu aplicada ao problema de escalonamento em um sistema de manufatura flexível**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2002.

ROPKE, S.; CORDEAU, J.F. Branch and Cut and Price for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. **Transportation Science**, v.43, p.267-286, 2009.

ROPKE, S.; PISINGER, D. **A general heuristic for vehicle routing problems**, technical report, Department of Computer Science, University of Copenhagen, 2005.

SCHLUTER, G. H.; SCHLUTER, M. R. **Gestão da empresa de transportes de cargas**. Porto Alegre: Horst, 2005.

SÉBASTIEN M.; Florence M.; Yves D.; Pascal V. H. **A Multistage Very Large-Scale Neighborhood Search for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows**. 2015.

SHAW, P. **A New Local Search Algorithm Providing High Quality Solutions to Vehicle Routing Problems**. Working Paper, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, 1997.

SOLOMON, M. M. **Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints**. Operations Research. Northeastern University, Boston, Massachus, 1987

TALBI, E. A taxonomy of hybrid metaheuristics. **Journal of Heuristics**, 2002.

TALBI, E. **Metaheuristics: from design to implementation**. John Wiley & Sons, New Jersey, v.74, p.500, 2009.

TARANTILIS, C. D.; STAVROPOULOU, F.; REPOUSSIS, P. P. A template-based tabu search algorithm for the consistent vehicle routing problem. **Expert Systems with Applications**, 39(4), 4233–4239, 2012.

TARANTILIS, C. D.; IOANNOU, G.; PRASTACOS, G. Advanced vehicle routing algorithms for complex operations management problem. **Journal of Food Engineering**. v. 70, n. 3, p. 455-471, 2005.

TASAN, A. S.; GEN, M. A genetic algorithm based approach to vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries. **Computers & Industrial Engineering**, 62(3), 755–761, 2012.

TAVAKOLI, M. M.; SAMI, A. Particle Swarm Optimization in Solving Capacitated Vehicle Routing Problem. **Bulletin of Electrical Engineering and Informatics**. Vol. 2, No. 4, December 2013, pp. 252~257.

TERUCHKIN, J. Custos logísticos podem definir a boa rentabilidade do negócio. **Revista Transporte Moderno**, São Paulo, jul. 2015. Disponível em: <<https://transportemodernoonline.com.br/2016/07/25/custos-logisticos-podem-definir-a-boa-rentabilidade-do-negocio/>>. Acesso em: 18 dez. 2016.

THANGIAH, S.R; PETROVIC, P. **Introduction to Genetic Heuristics and vehicle Routing Problems with Complex Constraints**. In: Woodruff, David, L. **Advances in Computacional and Stochastic Optimization, Logic programming , and Heuristic search: Interfaces in Computer Science and Operations research**. Kluwer Academic Publishers, 1997.

TOTH, P.; VIGO, D. Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem. **Discrete Applied Mathematics** v.123, p.487-512, 2002.

TOTH, P., & VIGO, D. The granular tabu search and its application to the vehicle-routing problem. **INFORMS Journal on Computing**, v.15, n.4, p.333-346, 2003.

TYAGI, M. A Practical Method for the Truck Dispatching Problem. **Journal of Operations Research Society of Japan**, v.10, p.76-92, 1968.

VALLE, C. É hora de ter a operação logística na palma da mão. **Revista Mobile Time**, jan. 2016. Disponível em: < <http://www.mobiletime.com.br/01/06/2016/e-hora-de-ter-a-operacao-logistica-na-palma-da-mao/440682/news.aspx>>. Acesso em: 18 dez. 2016.

VARGAS, R. A Importância da gestão do transporte rodoviário. **Administradores.com**, São Paulo, ago. 2008. Disponível em:

<<http://www.administradores.com.br/artigos/marketing/a-importancia-da-gestao-do-transporte-rodoviario/24814/>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

VIDAL, T.; CRAINIC, T. G.; GENDREAU, M.; LAHRICHI, N.; REI, W. A hybrid genetic algorithm for multidepot and periodic vehicle routing problems. **Operations Research**, 60(3), 611–624, 2012.

VILLEGAS, JG; PRINS, C; PRODHON, C; MEDAGLIA, AL. A GRASP with evolutionary path relinking for the truck and trailer routing problem. **Computers & Operations**. Elsevier, 2011.

WANG, C.; Mu, D.; Zhao, F.; Sutherland, J. W. A parallel simulated annealing method for the vehicle routing problem with simultaneous pickup–delivery and time windows. **Computers & Industrial Engineering**, 83, 111–122, 2015.

WANG, C.H.; LU, J.Z. A hybrid genetic algorithm that optimizes capacitated vehicle routing problems. **Expert Systems with Applications**, 36(2), 2921–2936, 2009.

WOODRUFF, D. L. Advances in Computational and Stochastic Optimization, **Logic Programming, and Heuristic Search**. 1998. Springer Science+Business Media, LLC, v. 91998.

XU, J.; KELLY, J.P. A Network Flow-Based Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem. **Transportation Science**, v.30, p.379-393, 1996.

YU, B.; Yang, Z. Z. An ant colony optimization model: The period vehicle routing problem with time windows. Transportation Research Part E: **Logistics and Transportation Review**, 47(2), 166–181, 2011.

YU, B., Yang, Z. Z., Yao, B. An improved ant colony optimization for vehicle routing problem. **European Journal of Operational Research**, 196(1), 171–176, 2009.

YU, B., Yang, Z.-Z., Xie, J.-X. A parallel improved ant colony optimization for multi-depot vehicle routing problem. **Journal of the Operational Research Society**, 62(1), 183–188, 2011.