

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA O PROBLEMA DE
ROTEAMENTO DE VEÍCULOS COM DESIGNAÇÃO DE
ENTREGADORES EXTRAS**

Vanessa de Oliveira Ferreira

SÃO CARLOS

2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA O PROBLEMA DE
ROTEAMENTO DE VEÍCULOS COM DESIGNAÇÃO DE
ENTREGADORES EXTRAS**

Vanessa de Oliveira Ferreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof^ª. Dra. Vitória Maria Miranda Pureza

Agência Financiadora: CAPES

São Carlos

2010

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

F383ah

Ferreira, Vanessa de Oliveira.

Uma abordagem heurística para o problema de roteamento de veículos com designação de entregadores extras / Vanessa de Oliveira Ferreira. -- São Carlos : UFSCar, 2011.
92 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2010.

1. Problema de roteirização de veículos. 2. Designação de entregadores extras. 3. Métodos Heurísticos. I. Título.

CDD: 658.5 (20ª)



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
Rod. Washington Luís, Km. 235 - CEP. 13565-905 - São Carlos - SP - Brasil
Fone/Fax: (016) 3351-8236 / 3351-8237 / 3351-8238 (ramal: 232)
Email : ppgep@dep.ufscar.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): Vanessa de Oliveira Ferreira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA E APROVADA EM 15/12/2010 PELA
COMISSÃO JULGADORA:

Prof.ª Dr.ª Vitória Maria Miranda Pureza
Orientador(a) PPGE/UFSCar

Prof. Dr. Reinaldo Morabito Neto
PPGE/UFSCar

Prof. Dr. Hugo Tsugunobu Yoshida Yoshizaki
POLI/USP

Prof. Dr. Roberto Antonio Martins
Coordenador do PPGE

“Se existe uma forma
de fazer melhor, descubra-a.”

Thomas Edison

AGRADECIMENTOS

À professora Vitória Pureza pela orientação, pelo conhecimento transmitido, pelo auxílio na realização dos trabalhos e pela amizade.

Aos professores Reinaldo Morabito, Marcos Arenales e Hugo Yoshizaki pela contribuição e atenção dispensada à dissertação.

A todos do Departamento de Engenharia de Produção e aos colegas do grupo de Modelagem pelo apoio e pela convivência.

À CAPES pela concessão da bolsa que financiou parcialmente este trabalho.

À Companhia de Bebidas Ipiranga e aos seus colaboradores pela atenção e fornecimento das informações solicitadas, muito valiosas para a realização deste estudo.

Aos meus pais Otávio e Cleusa, meus maiores exemplos de vida, pelo amor incondicional, pelas oportunidades de vida e aprendizado, pelo incentivo aos estudos e à busca de melhores oportunidades e por sempre acreditarem em minha capacidade.

Ao meu irmão Jefferson e toda a minha família pela força e pela vibração em relação a este trabalho.

Ao Diego por sempre estar presente, pelo carinho, pela enorme paciência nos momentos difíceis e cansativos, pelo suporte e pela ajuda.

Aos eternos amigos Laura, Camila, Fernanda Mariana, Monise, Luciana e Neto pelos anos de amizade e cumplicidade, por compartilharem os bons e maus momentos, pelo companheirismo e pelo incentivo constante.

E a todos os que não foram citados, mas que de alguma forma fizeram parte desta jornada.

RESUMO

FERREIRA, V. O. **Uma Abordagem Heurística para o Problema de Roteamento de Veículos com Designação de Entregadores Extras.** Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, 2010.

A busca pela excelência no atendimento aos clientes faz com que empresas investiguem estratégias que auxiliem a obtenção de soluções satisfatórias no mercado, como é o caso das empresas do setor de bebidas. Um dos obstáculos enfrentados por este setor é a dificuldade em distribuir os produtos demandados dentro da jornada de trabalho estabelecida, em função dos altos tempos de serviço existentes em cada ponto de demanda. Uma alternativa para reduzir violações de tempo de rota consiste em incluir a designação de entregadores extras às decisões de roteamento e programação. Este tratamento é pouco explorado na literatura e não foi encontrada nenhuma evidência de *softwares* comerciais que o considerem. Neste sentido, o corrente trabalho aborda o Problema de Roteamento de Veículos com designação de entregadores extras, com o objetivo de gerar rotas em que o número de clientes não atendidos em uma dada jornada de trabalho seja minimizado. Para tal, é proposta uma extensão da heurística de Clarke e Wright. A extensão proposta é aplicada a conjuntos de exemplos gerados com base nas instâncias clássicas de Solomon (1987) e Christofides et al. (1979). Os resultados obtidos nestas aplicações são comparados aos fornecidos pela heurística de Clarke e Wright segundo um conjunto de critérios de desempenho.

Palavras-chave: Problema de Roteamento de Veículos, Designação de Entregadores Extras, Métodos Heurísticos.

ABSTRACT

FERREIRA, V. O. **A Heuristic Approach for the Vehicle Routing Problem with Assignment of Extra Deliveries** Dissertation (Master) – Production Engineering Department, Federal University of São Carlos, 2010.

The pursuit of excellence in customer service drives companies to investigate strategies that help to produce satisfactory solutions to the market, as is the case of beverage companies. One of the obstacles faced by this sector is the difficulty in distributing the demanded products within regular working hours due to long service times in each demand site. An alternative for reducing violations of route time consists in including the assignment of extra deliverymen to the usual routing and scheduling decisions. Such treatment is hardly often explored in the literature and it was not found any evidence of commercial softwares that consider it. In this sense, the current work addresses the Vehicle Routing Problem with the assignment of extra deliverymen, with the aim of generating routes in which the number of unserved clients in regular working hours is minimized. To this end, we propose an extension of Clarke and Wright heuristic. The proposed extension is applied to sets of examples generated based on classic instances of Solomon (1987) and Christofides et al. (1979). The results of the application are compared to those provided by the heuristic of Clarke and Wright according to a set of performance criteria.

Key words: Vehicle Routing Problem, Assignment of Extra Deliverymen, Heuristic Methods.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
LISTA DE QUADROS	vi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	vii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – PROBLEMAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS	5
2.1 Introdução	5
2.1.1 Modelagem Matemática do PRV	8
2.2 Métodos Heurísticos para o PRV.....	11
2.3 Heurística de Clarke e Wright	14
2.4 Algoritmo de Varredura.....	17
2.5 Algoritmo de Solomon.....	19
2.6 Sistemas de Roteamento Comerciais	23
CAPÍTULO 3 – A EMPRESA ESTUDADA	28
3.1 A empresa estudada	28
3.1.1 Pré-vendas e faturamento	29
3.1.2 Elaboração das rotas	29
3.1.3 Montagem das cargas e entrega dos produtos	32
CAPÍTULO 4 – UMA EXTENSÃO DO ALGORITMO DE CLARKE E WRIGHT PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS COM DESIGNAÇÃO DE ENTREGADORES EXTRAS	35
4.1 Exemplo de Aplicação de CW_{ext}	40
4.1.1 Aplicação do algoritmo CW_{ext}	43
CAPÍTULO 5 – EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	61
5.1 Geração das instâncias	61
5.2 Resultados	63
5.2.1 Instâncias baseadas em Solomon (1987).....	64
5.2.1.1 CW_{ext} vs CW	65
5.2.1.2 CW_{ext} vs CW (com passo adicional).....	69
5.2.2 Instâncias baseadas em Christofides et al. (1979).....	71
5.2.2.1 CW_{ext} vs CW	71
5.2.2.2 CW_{ext} vs CW (com passo adicional).....	74
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE PESQUISAS FUTURAS ..	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÊNDICE I.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Ilustração da geração de rotas em um PRV.....	7
Figura 3.1: Tela apresentada após a criação das rotas pelo <i>software</i> de roteamento da empresa.....	31
Figura 4.1: Ilustração de passos da extensão do algoritmo de Clarke e Wright (CW_{ext}).....	39
Figura 4.2: Distribuição geográfica dos nós no exemplo ilustrativo.....	42
Figura 4.3: Conjunto de 5 rotas para a solução S, com $server[k] = 1$, para $k=1..5$	44
Figura 4.4: Designação de entregadores à rota 1 (4), com $server[1] = 2$	46
Figura 4.5: Designação de entregadores à rota 2 (3), com $server[2] = 2$	47
Figura 4.6: Designação de entregadores à rota 5 (3), com $server[5] = 2$	48
Figura 4.7: Solução $S = St_1$	49
Figura 4.8: Designação de entregadores à rota 1 (4), com $server[1] = 3$	50
Figura 4.9: Designação de entregadores à rota 2 (3), com $server[2] = 2$	51
Figura 4.10: Designação de entregadores à rota 4 (3), com $server[5] = 2$	52
Figura 4.11: Solução $S = St_2$	53
Figura 4.12: Designação de entregadores à rota 2, com $server[2] = 3$	54
Figura 4.13: Designação de entregadores à rota 3, com $server[3] = 2$	55
Figura 4.14: Designação de entregadores à rota 3, com $server[3] = 3$	56
Figura 4.15: Solução final S^* do algoritmo CW_{ext} com $server[k] = 2$ para $k=1..2$	58
Figura 4.16: Solução final do algoritmo CW.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: <i>Softwares</i> de roteamento disponíveis no mercado.....	27
Tabela 4.1: Dados dos nós no exemplo ilustrativo.....	41
Tabela 4.2: Distância ou tempo de viagem entre pares de nós i e j no exemplo ilustrativo.....	42
Tabela 4.3: Economias da união dos nós i e j em uma única rota.....	43
Tabela 4.4: Resultados com o exemplo ilustrativo.....	59
Tabela 5.1: Desempenho do algoritmo CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Solomon (1987) e tempo máximo de rota igual a 150 min.....	65
Tabela 5.2: Desempenho do algoritmo CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Solomon (1987) e tempo máximo de rota igual a 230 min.....	66
Tabela 5.3: Desempenho do algoritmo CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Solomon (1987) e tempo máximo de rota igual a 480 min.....	67
Tabela 5.4: Desempenho do algoritmo com passo adicional CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Solomon (1987) e tempo máximo de rota igual a 150 min.....	70
Tabela 5.5: Resultados agregados para os algoritmos CW e CW_{ext} com passo adicional para tempo máximo de rota igual a 230 min.....	70
Tabela 5.6: Resultados agregados para os algoritmos CW e CW_{ext} com passo adicional para tempo máximo de rota igual a 480 min.....	70
Tabela 5.7: Desempenho do algoritmo CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Christofides et al. (1979) e tempo máximo de rota igual a 150 min.....	71
Tabela 5.8: Desempenho do algoritmo CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Christofides et al. (1979) e tempo máximo de rota igual a 230 min.....	72
Tabela 5.9: Desempenho do algoritmo CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Christofides et al. (1979) e tempo máximo de rota igual a 480 min.....	73

Tabela 5.10: Desempenho do algoritmo com passo adicional CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Christofides et al. (1979) e tempo máximo de rota igual a 150 min.....	74
Tabela 5.11: Desempenho do algoritmo com passo adicional CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Christofides et al. (1979) e tempo máximo de rota igual a 230 min.....	75
Tabela 5.12: Desempenho do algoritmo com passo adicional CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Christofides et al. (1979) e tempo máximo de rota igual a 480 min.....	75
Tabela I.1: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 150 min.....	85
Tabela I.2: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW_{ext} para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 150 min.....	85
Tabela I.3: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 230 min.....	86
Tabela I.4: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW_{ext} para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 230 min.....	86
Tabela I.5: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 480 min.....	86
Tabela I.6: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW_{ext} para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 480 min.....	87
Tabela I.7: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW com passo adicional para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 150 min.....	87

Tabela I.8: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CWext com passo adicional para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 150 min.....	87
Tabela I.9: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW com passo adicional para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 230 min.....	88
Tabela I.10: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CWext com passo adicional para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 230 min.....	88
Tabela I.11: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW com passo adicional para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 480 min.....	88
Tabela I.12: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CWext com passo adicional para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 480 min.....	89
Tabela I.13: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 130 min.....	89
Tabela I.14: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CWext para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 130 min.....	89
Tabela I.15: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 250 min.....	90
Tabela I.16: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CWext para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 250 min.....	90

Tabela I.17: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 480 min.....	90
Tabela I.18: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CWext para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 480 min.....	90
Tabela I.19: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW com passo adicional para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 150 min.....	91
Tabela I.20: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CWext com passo adicional para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 150 min.....	91
Tabela I.21: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW com passo adicional para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 230 min.....	91
Tabela I.22: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CWext com passo adicional para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 230 min.....	92
Tabela I.23: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW com passo adicional para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 480 min.....	92
Tabela I.24: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CWext com passo adicional para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 480 min.....	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1: Características das instâncias nos cenários de teste com exemplos de Solomon (1987).....	62
Quadro 5.2: Características das instâncias nos cenários teste com exemplos de Christofides et al (1979).....	62

LISTA DE ABREVIATURAS

CW	Algoritmo de Clarke e Wright
CW_{ext}	Extensão do algoritmo de Clarke e Wright
DP	Desvios percentuais
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
PRV	Problema de Roteamento de Veículos
n	Número de clientes a serem visitados
NV	Tamanho da frota
i	Clientes ou depósito
j	Clientes ou depósito
v	Veículos
d_i	Demanda do cliente i
t_i^v	Tempo de serviço do veículo v no cliente i
t_{ij}^v	Tempo de viagem do veículo v entre os clientes i e j
K_v	Capacidade do veículo v
c_{ij}^v	Distância de viagem do cliente i ao cliente j para o veículo v
T_v	Tempo máximo de viagem para o veículo v
r	Número de rotas correntes
$Sav(i,j)$	Economia em distância ao unir i e j na mesma rota
$server[k]$	Número de entregadores designados à rota k em soluções tentativa
$server_s(k)$	Número de entregadores designados à rota k na solução corrente
$tentativa[k]$	Último número de entregadores testado para designação à rota k

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

No ambiente empresarial, a competitividade vem se intensificando significativamente ao longo dos anos. Por um lado, tornar-se competitivo é fundamental pra a sobrevivência das empresas; por outro, os critérios de competitividade estão cada vez mais complexos e em constante mudança. Em particular, os clientes tornam-se cada vez mais exigentes quanto à qualidade dos bens e serviços. Tais exigências de mercado, confrontadas com a necessidade de redução de custos, impõem que as empresas proporcionem a diferenciação de seus produtos e serviços da forma mais barata possível.

O nível de serviço logístico tornou-se, segundo esta tendência, um diferenciador no mercado. Reduzir o prazo de entrega, aumentar a disponibilidade de produtos, efetuar entregas com horas determinadas e o cumprimento dos prazos são algumas exigências que se espera serem atendidas pelo serviço logístico. O sistema logístico deve responder racional e eficazmente às variações constantes do mercado (flutuações), manter um nível estabelecido de serviço ao cliente (serviço), não ultrapassar o nível de investimento permitido (investimento) e atender a todos os aspectos qualitativos relacionados (qualidade) (FRANCISCHINI e GURGEL, 2002). Para Bowersox e Closs (2008), a logística é “um esforço integrado com o objetivo de ajudar a criar valor para o cliente pelo menor custo total possível”.

Na visão de Pozo (2007), a logística tem como função estudar a maneira como a administração pode otimizar os recursos de suprimentos, estoques e distribuição dos produtos e serviços com que a empresa se mostra ao mercado, através de planejamento, organização e controle efetivo de suas atividades, flexibilizando os fluxos dos produtos. O autor reforça ainda que a logística está integrada a atividades como a administração

dos pedidos de vendas, o sistema de suprimento de materiais, o controle dos estoques de matéria-prima, materiais auxiliares e de manutenção, as peças em processo e o estoque acabado, o sistema de planejamento e controle da produção e, finalmente o sistema de movimentação e distribuição dos produtos e serviços. Note, entretanto, que o nível de importância ao serviço logístico varia conforme o perfil do cliente interno ou externo, já que suas necessidades são diferenciadas. Assim, cabe a cada empresa equacionar a redução de custos com a melhoria do nível de serviço oferecido, observando as especificidades de seus clientes. Fica evidente que a atividade logística precisa ser incorporada na estratégia de negócio da empresa.

Todas as áreas operacionais de uma cadeia de suprimentos oferecem uma variedade de desafios para sua administração eficiente. O elo final da cadeia, o transporte a partir dos centros de distribuição até os consumidores, usualmente é o mais caro da cadeia de distribuição (GALVÃO, 2001). Para que a empresa tenha êxito na realização desse transporte, ela deve, portanto, planejar e executar as atividades de distribuição de uma maneira racional, levando em consideração todos os fatores econômicos envolvidos.

O gerenciamento da distribuição de bens e serviços apresenta problemas de tomada de decisão em níveis estratégico, tático e planejamento operacional. Decisões relacionadas à localização das facilidades, como plantas, depósitos e armazéns, podem ser definidas como estratégicas; enquanto problemas para definição de tamanho e *mix* de frotas são vistos como táticos. No nível operacional, decisões sobre roteamento e programação de veículos e equipes responsáveis pela execução das tarefas são tomadas dia-a-dia.

Além das decisões acima mencionadas, o planejamento efetivo de distribuição requer uma variedade de outras decisões exógenas, tais como definir o tamanho da área

servida por cada depósito, o tamanho e o *mix* da frota disponível em cada depósito, a distribuição das entregas entre frota própria e transportadora terceirizada, e os níveis de serviço aos clientes, isto é, a frequência das entregas (BODIN et al., 1983).

A busca da minimização dos custos logísticos nas atividades de distribuição passou a ser um objetivo de intensa pesquisa e de grande interesse pelas empresas. Como no Brasil, as empresas utilizam principalmente o modal rodoviário para o transporte de suas cargas, destaca-se ainda mais a necessidade que as empresas distribuidoras têm por otimizar seus gastos neste setor.

Planejar as rotas e operação de veículos de entrega é uma operação geralmente complexa. Em muitas aplicações práticas, cada um dos veículos utilizados deve passar diariamente por diversos pontos de demanda, seja para realizar entregas, fazer coletas, vender, dar suporte técnico ou qualquer outro serviço de campo. Como são muitas as considerações envolvidas (tempos de viagem, capacidades de carga, horários de atendimento, entre outras), a determinação de qual veículo deve atender cada requisição, qual a seqüência ideal de visitas e, finalmente, quais as rotas a serem executadas, torna-se uma tarefa desafiadora. Tal motivação levou ao surgimento e consolidação de uma importante classe de problemas chamada de *Problemas de Roteamento de Veículos*.

Em problemas de roteamento de veículos busca-se construir um conjunto de rotas de atendimento de pontos de demandas com vistas à otimização de um ou mais objetivos. A grande maioria dos problemas de roteamento de veículos tem natureza combinatória, e é considerada de difícil resolução, o que explica o grande volume de pesquisa e desenvolvimento de métodos para o seu tratamento. Apesar destes esforços, novas situações práticas surgem e definem variações do problema para as quais os métodos existentes podem não ser os mais adequados.

Este trabalho aborda uma situação real de empresas com atividades de entrega de produtos em centros urbanos, onde pontos de demanda próximos entre si (*cluster*) têm associado um ponto de parada para o veículo que os irá servir. A entrega das cargas de cada ponto de demanda de um dado *cluster* é então realizada por entregadores que visitam os clientes a pé. Note que a quantidade de entregadores em cada rota geralmente afeta os tempos de serviço e, portanto, os tempos de conclusão do serviço. Estes, por sua vez, se refletem no número de clientes que podem ser atendidos em um dado dia de serviço.

Para este contexto, esta pesquisa propõe um método heurístico para planejamento de rotas, no qual é definido, além do roteamento dos pontos de parada, o número de entregadores que cada rota deve possuir. O objetivo principal é o de obter rotas de baixo custo que maximizem o número de clientes atendidos. As vantagens da abordagem são observadas por meio de experimentos computacionais gerados a partir de uma das instâncias propostas por Solomon (1987) e Christofides et al (1979). Tanto quanto sabemos, esta situação prática é pouco abordada na literatura.

O restante desta dissertação é organizado como se segue. No Capítulo 2 são discutidas as principais características de problemas de roteamento de veículos e de *softwares* de roteamento comerciais. Além disso, são apresentados o problema clássico de onde se derivou a variação estudada e os métodos da literatura relevantes para os propósitos deste trabalho. O Capítulo 3 apresenta a motivação para o estudo e uma descrição dos procedimentos adotados para elaboração de rotas e atendimento aos clientes pela empresa estudada. O método proposto e sua aplicação a um pequeno exemplo são apresentados no Capítulo 4. O Capítulo 5 apresenta a discussão sobre a elaboração das instâncias e dos resultados dos experimentos computacionais, seguido de conclusões e perspectivas de pesquisa futura no Capítulo 6.

CAPÍTULO 2 – PROBLEMAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS

2.1 Introdução

Em linhas gerais, problemas de roteamento de veículos se resumem à definição de rotas para atendimento de demandas, as quais podem se apresentar na forma tanto de prestação de serviço como na coleta e/ou entrega de pessoas ou mercadorias em uma determinada região geográfica. Um dos principais desafios de pesquisadores é o de aplicar ou desenvolver metodologias para satisfação destas demandas de forma que um ou mais objetivos sejam otimizados.

Existe uma vasta literatura sobre o assunto, endereçando situações com diferentes características operacionais. Assad (1988) propõe o seguinte grupo de elementos para caracterização geral destes problemas:

- Natureza e características dos atendimentos: somente coletas ou entregas; coletas de retorno (“*backhauls*”); um único produto ou múltiplos produtos; atendimento parcial ou total da demanda; conhecimento das demandas *a priori*; existência de incertezas na demanda; necessidade de programação de visitas periódicas com frequências definidas; prioridade de atendimentos.
- Frota de veículos: homogênea ou heterogênea; restrições de capacidade (peso ou volume); restrições de carregamento e equipamento; vínculo entre o tipo de veículo e o local da base; compatibilidade entre o tipo de veículo e o tipo de produto a ser transportado; frota fixa ou variável; frota localizada em um único depósito ou em múltiplos depósitos.
- Requisitos de pessoal: duração da jornada normal de trabalho; opção e número de horas extras; horários e locais de início e término das jornadas de trabalho do

pessoal; parada para almoço com horários pré-definidos, e outros tipos de parada como, por exemplo, para descanso; possibilidade de viagens com duração superior a um dia.

- Requisitos de programação: atendimento de clientes em um dado dia da semana; janelas de tempo para coleta e entrega (rígidas ou flexíveis); tempos de carga e descarga; horários de abertura e fechamento do depósito.

De forma geral, a resolução de problemas de roteamento de veículos implica em fornecer para cada veículo, um roteamento e uma programação dos horários de suas atividades. O roteamento especifica a sequência de visita dos pontos de demanda, enquanto a programação identifica o horário em que as atividades ocorrem nesses locais. Em algumas situações, define-se também o dimensionamento da frota. O objetivo buscado nestas decisões depende da aplicação em questão, tais como:

- Minimizar o custo total (distância/tempo) da operação;
- Minimizar o número de veículos utilizados;
- Maximizar o nível de serviço ao cliente;
- Uma combinação das aplicações anteriores.

Problemas de roteamento encontram aplicações em campos diversos, os quais incluem a entrega de mercadorias a clientes, o abastecimento de postos de combustíveis, o recolhimento e transporte de lixo até os depósitos apropriados, a instalação de um equipamento em diferentes residências, dentre outros. Revisões sobre problemas de roteamento de veículos, métodos e aplicações associados, podem ser encontrados em Bodin et al. (1983), Assad (1988), Ronen (1988), Hall e Partyka (1997), Cunha (2000), Laporte et al. (2000), Breedam (2001), Heinen (2005) e Yeun et al. (2008).

O Problema de Roteamento de Veículos (PRV) clássico, base deste trabalho, consiste na determinação de rotas realizadas por uma frota homogênea e com limitações de capacidade que parte e retorna a um único depósito. A frota deve satisfazer a demanda por coleta ou entrega de bens de um conjunto de clientes, com localizações espaciais e demandas conhecidas. Cada cliente deve ter sua demanda totalmente atendida por um único veículo. A demanda total dos clientes não deve exceder a capacidade total do veículo designado para a rota, assim como o tempo total de cada rota (composto por tempos de deslocamento do veículo e do serviço em cada cliente) não deve exceder um limite pré-estabelecido, correspondente ao fim da jornada de trabalho.

Apesar do seu enunciado relativamente simples, o PRV tem elevada complexidade computacional, o que justifica o interesse de um grande número de pesquisadores no desenvolvimento de métodos para sua resolução. Dantzig e Ramser foram os primeiros pesquisadores a formulá-lo em 1959, quando estudaram uma aplicação real de distribuição de gasolina para estações de venda de combustíveis.

A Figura 2.1 ilustra uma possível solução para um PRV.

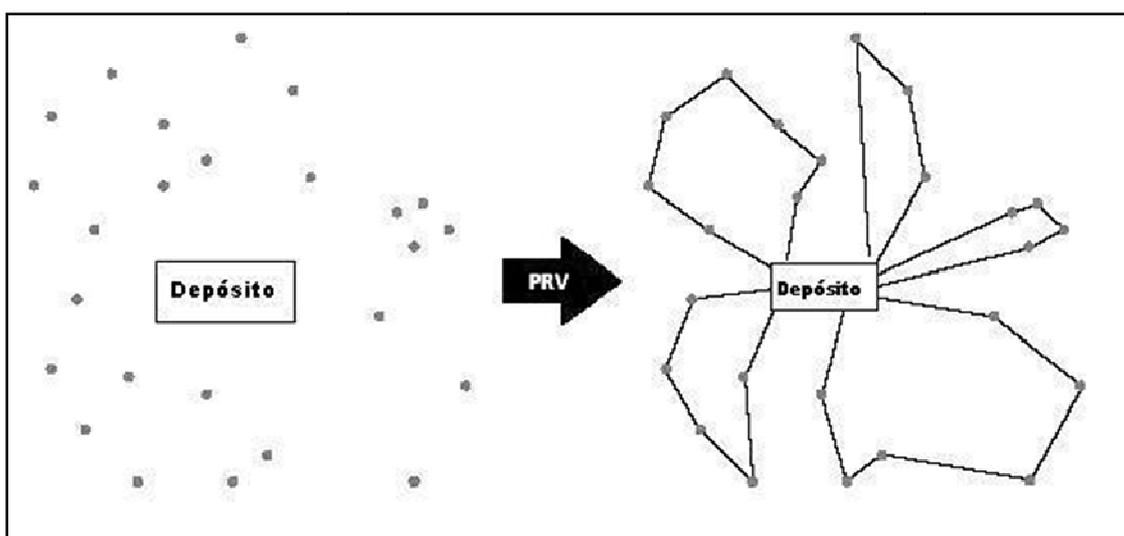


Figura 2.1: Solução de um PRV composta de cinco rotas.

2.1.1 Modelagem Matemática do PRV

O PRV pode ser formulado matematicamente por diversos modelos de programação inteira. Um modelo que o expressa claramente, é proposto em Golden et al. (1977) e apresentado a seguir.

Dados de entrada: Constantes

n : número de clientes (nós) a serem visitados

NV : tamanho da frota

Índices

i, j : clientes ou depósito ($i, j = 1$ (depósito); $i, j = 2 \dots n$ (clientes))

v : veículos ($v = 1 \dots NV$)

Dados de entrada: Vetores e Matrizes

d_i : demanda do cliente i

t_i^v : tempo de serviço do veículo v no cliente i

t_{ij}^v : tempo de viagem do veículo v entre os clientes i e j

K_v : capacidade do veículo v

c_{ij}^v : distância de viagem do cliente i ao cliente j para o veículo v

T_v : tempo máximo de viagem para o veículo v

Variáveis de decisão

$$x_{ij}^v = \begin{cases} 1, & \text{se o arco entre os clientes } i \text{ e } j \text{ for percorrido pelo veículo } v \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

X = matriz com componentes $x_{ij} = \sum_{v=1}^{NV} x_{ij}^v$, especificando conexões independentemente

do tipo de veículo.

$$(2.1) \quad \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{v=1}^{NV} c_{ij}^v x_{ij}^v$$

Sujeita a:

$$(2.2) \quad \sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^{NV} x_{ij}^v = 1 \quad (j = 2, \dots, n)$$

$$(2.3) \quad \sum_{j=1}^n \sum_{v=1}^{NV} x_{ij}^v = 1 \quad (i = 2, \dots, n)$$

$$(2.4) \quad \sum_{i=1}^n x_{ip}^v - \sum_{j=1}^n x_{pj}^v = 0 \quad (v = 1, \dots, NV; p = 1, \dots, n)$$

$$(2.5) \quad \sum_{i=1}^n d_i \left(\sum_{j=1}^n x_{ij}^v \right) \leq K_v \quad (v = 1, \dots, NV)$$

$$(2.6) \quad \sum_{i=1}^n t_i^v \sum_{j=1}^n x_{ij}^v + \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n t_{ij}^v x_{ij}^v \leq T_v \quad (v = 1, \dots, NV)$$

$$(2.7) \quad \sum_{j=2}^n x_{1j}^v \leq 1 \quad (v = 1, \dots, NV)$$

$$(2.8) \quad \sum_{i=2}^n x_{i1}^v \leq 1 \quad (v = 1, \dots, NV)$$

$$(2.9) \quad x_{ij}^v = 0 \text{ ou } 1 \quad \text{para } \forall i, j, v$$

$$(2.10) \quad X \in S$$

A função objetivo do problema é fornecida pela equação (2.1) e visa minimizar a distância total percorrida. As restrições que garantem que a demanda de cada cliente seja atendida por exatamente um veículo são apresentadas em (2.2) e (2.3). A

continuidade da rota é representada pela equação (2.4), isto é, se um veículo chega a um cliente ou depósito (nó), este deve sair do nó. A restrição de capacidade é dada em (2.5) e a restrição de tempo total de rota é apresentada em (2.6). As inequações (2.7) e (2.8) asseguram que um veículo saia e chegue ao depósito no máximo uma vez.

A restrição (2.10), imposta à matriz X , evita sub-rotas. O conjunto de soluções S possui restrições impostas a cada veículo v , isto é, S pode ser expresso como a união de conjuntos S_v , definidos como:

$$S = \left\{ x_{ij}^v : \sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} x_{ij}^v \leq |Q| - 1 \right\}$$

em que, para todo subconjunto não vazio $Q = \{1, \dots, n\}$, onde $|Q|$ representa a cardinalidade do conjunto Q . Esta restrição proíbe, por exemplo, a decisão $x_{ii}^v = 1$, que representa uma sub-rota.

O modelo descrito acima caracteriza as condições necessárias e suficientes para assegurar uma solução factível e ótima. Neste modelo admite-se frota heterogênea, e não se permite o atendimento de um cliente j por mais de um veículo.

Em relação à sua complexidade computacional, o PRV é classificado como *NP-hard* (GAREY; JOHNSON, 1979), ou seja, não se conhecem algoritmos capazes de resolvê-lo otimamente em tempo polinomial. Por essa razão, métodos heurísticos são comumente utilizados para a resolução de problemas de médio a grande porte. Esses métodos não garantem a obtenção da solução ótima, mas podem encontrar soluções de boa qualidade em tempos razoáveis para a aplicação em questão.

2.2 Métodos Heurísticos para o PRV

O interesse que o Problema de Roteamento de Veículos e suas variantes despertam na comunidade acadêmica suscitou ao longo das últimas cinco décadas a proposição de diferentes métodos exatos e heurísticos. Dentre as técnicas exatas empregadas para resolução desses problemas, incluem-se programação dinâmica, relaxação lagrangiana, teoria dos grafos, geração de colunas e métodos de busca em árvore (*branch-and-bound*, *branch-and-cut*, *branch-and-price* e *branch-and-cut-and-price*). Exemplos da aplicação desses métodos podem ser encontrados em Fisher e Jaikumar (1978), Magnanti (1981), Christofides et al. (1981; 1995), Stewart e Golden (1984), Thompson e Psaraftis (1993), Toth e Vigo (2000) e Christiansen e Lysgaard (2006).

Apesar da existência de métodos exatos para resolução de PRVs, a alta complexidade computacional deste problema foi a motivação decisiva para que um grande volume de pesquisa passasse a ser destinado ao desenvolvimento de métodos heurísticos a partir da década de 1970. Reeves (1993) define heurística como uma técnica que busca boas soluções ótimas ou sub-ótimas a um custo computacional razoável, sem garantia de otimalidade ou factibilidade sendo, em muitos casos, incapaz de declarar quão próxima uma solução factível está da solução ótima. Os métodos heurísticos exploram uma área relativamente limitada do espaço de soluções, porém, quando bem projetados, podem produzir soluções de boa qualidade em uma fração do tempo requerido por um método exato.

Ao longo dos anos, diversos tipos de heurísticas têm sido propostos para resolução do PRV. Laporte et al. (2000) classifica as heurísticas em duas classes principais: heurísticas clássicas e metaheurísticas. Alguns trabalhos (MARINAKIS e MIGDALAS, 2002; LAPORTE e SEMET, 1998) subdividem as heurísticas clássicas

em três tipos: métodos construtivos, métodos de duas fases e métodos de melhoria. Também não é incomum encontrar trabalhos (GENDREAU et al., 1994; REGO, 1998; BREEDAM, 1995) em que consta como quarta classe o método de otimização incompleta.

Heurísticas construtivas criam rotas pela adição sucessiva de nós clientes ainda não atendidos nas rotas em formação. A seleção dos nós segue algum critério de seleção pré-estabelecido, como, por exemplo, priorizando-se opções que minimizam a distância adicional com a inclusão dos nós nas rotas. Dentre os métodos construtivos mais conhecidos, pode-se citar o algoritmo de Clarke e Wright (1964), o algoritmo de Solomon (1987), o algoritmo de varredura (GILLET e MILLER, 1974), o algoritmo de pétalas (BALINSKI e QUANDT, 1964), e o algoritmo *cluster-first, route second* de Fisher e Jaikumar (1981). Outros exemplos da aplicação de heurísticas construtivas podem ser encontrados em Wren and Holliday (1972), Mole e Jameson (1976), Christofides et al. (1979), Nelson et al. (1985), Altinkemer e Gavish (1991), Wark and Holt (1994), Bramel e Simchi-Levi (1995), Santos e Cordenonsi (2001), Campbell e Savelsberg (2004) e Schopf et al. (2004).

Heurísticas de melhoria, por sua vez, visam aprimorar uma solução inicial (gerada, por exemplo, por uma heurística de construção) por meio de movimentos, geralmente simples, de troca e/ou realocação de clientes para outras partes da solução. Estes movimentos podem ser usados para melhoria de uma única rota (movimentos intra-rota) ou de mais de uma rota (movimentos entre-rotas) (SIMAS, 2007). Os possíveis movimentos aplicados a uma dada solução corrente S (no início, S é igual à solução inicial) resultam em soluções vizinhas de S . A substituição de S por uma solução vizinha S' que resulta em melhorias segundo a função objetivo define um processo iterativo, geralmente finalizado quando nenhuma das soluções vizinhas da

solução corrente S é melhor que S (um ótimo local foi atingido). Neste caso, a heurística de melhoria é dita como de busca local. Segundo Laporte e Semet (1998) e Laporte et al. (2000), a maioria dos métodos de melhoria pode ser descrita a partir de movimentos de troca de arestas k -opt, inicialmente propostos por Croes (1958) com $k = 2$, e generalizado em Lin (1965). Métodos de melhoria do tipo k -opt consistem na remoção de k arcos da solução e sua substituição por outros k arcos, com a finalidade de diminuir a distância total percorrida e/ou reduzir o número de rotas. Or (1976) e Renaud et al. (1996) também propuseram métodos para melhoria de rotas baseados no método de melhoria do tipo k -opt. Referências de heurísticas de busca local para o PRV podem ser encontradas em Salhi e Rand (1993) e Rochat e Taillard (1995).

Metaheurísticas são métodos baseados em princípios e idéias geralmente oriundas de outras áreas do conhecimento, e que melhoram consideravelmente a eficiência de algoritmos de busca local e o tamanho de instâncias solúveis de problemas difíceis encontrados na prática (NORONHA, 2001). O objetivo das metaheurísticas é de evitar o aprisionamento da busca em ótimos locais, possibilitando soluções de pior qualidade durante as iterações, com a esperança de obter novas soluções vizinhas melhores que as encontradas até então. Dentre as metaheurísticas mais populares incluem-se Busca Tabu, Algoritmos Genéticos, *Simulated Annealing*, *Grasp*, Colônia de Formigas, Busca Dispersa, Algoritmos Meméticos, e Busca em Vizinhança Variável. Aplicações de metaheurísticas para o PRV podem ser encontrados em Pureza e França (1991), Osman (1993), Gendreau et al. (1994), Dorigo e Caro (1999), Berger e Barkaoui (2003), Baker e Ayechev (2003), Baker e Carreto (2003), Martí et al. (2006) e Sosa et al. (2007).

Aplicar uma metaheurística para resolução do problema abordado seria uma alternativa mais alinhada ao atual desenvolvimento dos métodos aproximados, contudo

optou-se pela utilização de uma heurística clássica no presente trabalho. As próximas seções descrevem com maior detalhe duas das mais populares contribuições desta classe de métodos para o PRV, e uma heurística para o PRV com restrições de janelas de tempo, esta última incluída por sua relevância para os propósitos deste trabalho.

2.3 Heurística de Clarke e Wright

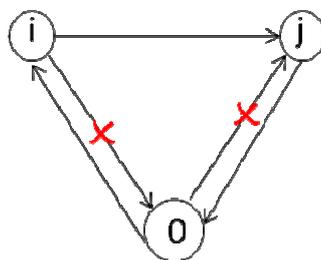
O algoritmo das Economias (*Savings*), proposto em Clarke e Wright (1964), é uma heurística iterativa de construção baseada na noção de economias, definidas como o ganho da combinação ou união de duas rotas existentes. A economia de uma dada união consiste, portanto, da redução do número de veículos (em uma unidade), e da redução da distância total percorrida. Inicialmente, considera-se que cada veículo atenda um único cliente; a cada passo da heurística é então efetuada a união factível de duas rotas correntes que proporcione a maior economia. O algoritmo é finalizado quando todas as possíveis uniões de rotas correntes impliquem em violação, seja de tempo máximo de rota, seja de capacidade do veículo.

O algoritmo de Clarke e Wright original não impõe limitações para o número de veículos utilizados no atendimento dos clientes. Esta condição pode, entretanto, ser facilmente contemplada conforme visto na seguinte variação do algoritmo (aqui denominada CW) em que o número de veículos está restrito a um tamanho de frota NV .

Passos do Algoritmo CW

1. Seja S a solução composta de $r = n$ rotas, cada qual servindo um dos n nós cliente.

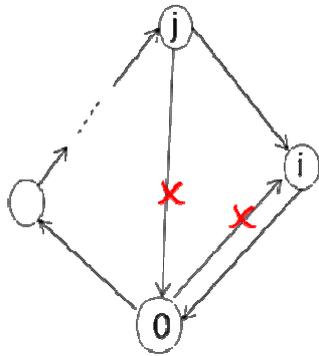
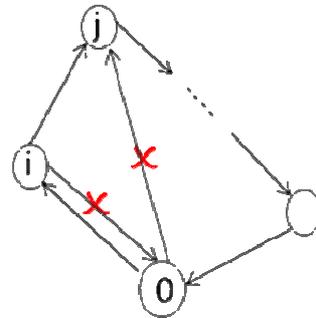
2. Calcule a economia em distância ao se servir o par de nós clientes i e j ($i \neq j$) na mesma rota por meio da equação $Sav(i,j) = l(0,i) + l(0,j) - l(i,j)$, onde $l(i,j)$ é a distância entre os nós i e j . Armazene os valores resultantes em uma lista L .
3. Ordene em valor decrescente as economias $Sav(i,j)$ calculadas no passo anterior.
4. Enquanto $L \neq \emptyset$, faça:
 - 4.1. Percorra L a partir de seu primeiro elemento, verificando se o par de nós clientes i e j associado ao elemento em questão pode ser servido na mesma rota. Ou seja:
 - (a) Se i e j pertencem a rotas diferentes compostas apenas por eles, ou
 - (b) Se a rota de apenas um dos nós (i ou j) é composta apenas por ele, e se o outro nó está na extremidade da rota composta por outros nós, ou
 - (c) Se i e j pertencem a rotas diferentes compostas por outros nós e estão nas extremidades das rotas.
 - 4.2. Se o par de nós i e j associado ao elemento de L em questão satisfaz alguma das condições (a)-(c), faça
 - (a) Se a condição (a) é satisfeita, forme uma rota com os nós i e j .



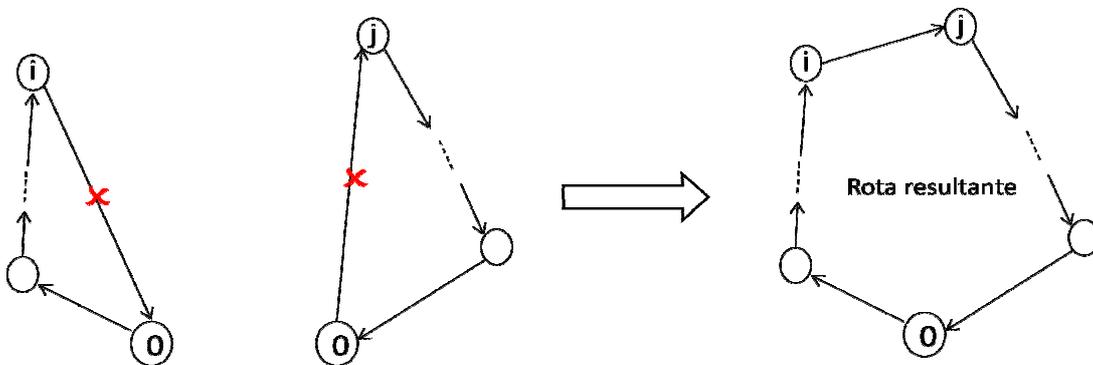
(a) Rota formada pela união dos nós i e j .

- (b) Se a condição (b) é satisfeita, adicione o nó da rota composta apenas por ele à rota do outro nó. Seja i o nó cuja rota é composta

apenas por ele; adicione i ao fim (início) da rota de j se este for o último (primeiro) nó da rota, eliminando o arco entre j e o depósito e um arco entre i e o depósito.

(b1) Inserção de i no fim da rota(b2) Inserção de i no início da rota

- (c) Se a condição (c) é satisfeita, una as rotas, eliminando os arcos entre i e o depósito e entre j e o depósito, e adicionando um arco entre i e j .



(c) União de duas rotas

4.3. Caso a rota resultante da união selecionada não viole restrições de capacidade ou de tempo máximo de rota, implemente a união, decremente o número de rotas em uma unidade ($r = r-1$), e elimine o elemento de L associado.

5. Se $r > NV$, selecione as NV rotas com o maior número de nós clientes para compor a solução final S^* . Os clientes das $(r - NV)$ rotas restantes não são atendidos.

Note no passo 5, que a solução é composta apenas pelo subconjunto das NV rotas com maior número de clientes. Em caso de empate, outros critérios poderiam ser adicionados para seleção das rotas, por exemplo, o subconjunto de rotas com maior demanda total.

2.4 Algoritmo de Varredura

Proposta em Gillett e Miller (1974), esta heurística constrói uma solução em duas fases. Na primeira fase, os pontos de demanda são designados a agrupamentos segundo um critério de proximidade. Cada agrupamento está associado a um dos veículos disponíveis. A segunda fase constrói então uma rota para cada agrupamento de forma independente. O princípio desta heurística consiste no desenvolvimento de trajetos preferencialmente entre nós em proximidade geográfica.

O agrupamento de nós clientes se dá a partir de uma linha imaginária centrada no depósito. Um nó semente é escolhido de forma aleatória e o raio centrado no depósito percorre a região no sentido horário ou anti-horário. Os nós encontrados no decorrer da varredura são designados a um dos veículos disponíveis até se atingir o limite da capacidade do mesmo. Se ainda houver nós não roteados, um novo veículo é selecionado, e o processo é continuado até que todos os nós tenham sido designados a agrupamentos. Cada grupo de nós é então sequenciado visando à construção de rotas com menor distância total.

Segundo Ballou (2001) a desvantagem do método tem relação com a maneira com que as rotas são formadas. Pelo fato do processo ocorrer em dois estágios, questões temporais (como tempo total da rota e janelas de tempo) não são bem tratadas pelo algoritmo. Os passos que descrevem a heurística de Varredura são descritos a seguir:

Passos da Heurística de Varredura

1. Calcule os ângulos e os raios entre os nós clientes i ($i = 1, \dots, n$) de acordo com suas coordenadas polares, considerando que o sistema de coordenadas tem o depósito como origem e um nó cliente base escolhido aleatoriamente.
2. Para cada quadrante delimitado pelas coordenadas do depósito, ordene os nós clientes com base em suas coordenadas de forma que os nós com menor ângulo sejam definidos nas primeiras posições.
3. Selecione um veículo k disponível para utilização e inicialize o agrupamento de nós associado a k como \emptyset .
4. Construir uma nova rota, seguindo os seguintes passos:
 - (a) Incluir um novo cliente no cluster enquanto a soma das demandas dos clientes deste cluster não ultrapassar a capacidade do veículo atribuído a ele.
 - (b) Elabore o sequenciamento dos nós para cada veículo a partir do critério de roteamento desejado.
5. Se ainda houver nós não roteados, selecione um novo veículo e repita o passo 4. Caso contrário, guardar a solução atual e ir ao passo 6.

6. Otimize cada rota separadamente. Realize trocas de nós de rotas adjacentes, se essa ação reduzir as distâncias das rotas. Caso não haja mais trocas factíveis, pare.

2.5 Algoritmo de Solomon

Solomon (1987) propõe uma heurística construtiva para o PRV com janelas de tempo (denominada i), na qual clientes não roteados são iterativamente inseridos na solução. Inicialmente é selecionado um nó semente para inicializar a primeira rota, após o que, a seleção de clientes não roteados e suas posições de inserção na rota parcial são determinadas por uma função gulosa que combina custos temporais e geográficos. Uma nova rota é iniciada quando todas as inserções de clientes na rota atual provocarem violação de restrições temporais ou de capacidade do veículo. Seguem os passos que compõem a heurística i de Solomon:

Passos da Heurística i de Solomon

1. Selecione um nó cliente não roteado (semente) para iniciar a rota corrente segundo um dos critérios a seguir:
 - (a) Cliente não roteado mais distante do depósito
 - (b) Cliente não roteado com menor prazo para início do serviço
2. Seja (i_0, i_1, \dots, i_n) a sequência de nós clientes na rota corrente, sendo $i_0 = i_n = 0$. Para cada nó não roteado, obtenha a posição de inserção factível que fornece a melhor avaliação conforme o critério:

$$c_1(i(u), u, j(u)) = \text{Min}[c_1(i_{p-1}, u, i_p)], \quad p = 1, \dots, m$$

em que,

$$c_1(i, u, j) = \alpha_1 c_{11}(i, u, j) + \alpha_2 c_{12}(i, u, j), \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \alpha_1, \alpha_2 \geq 0$$

tal que,

$$c_{11}(i, u, j) = d(i, u) + d(u, j) - \mu d(i, j), \mu \geq 0$$

$$\text{e } c_{12}(i, u, j) = b_{ju} - b_j$$

sendo b_j = tempo atual de início de serviço no nó j e b_{ju} = tempo de início de serviço no nó j com a inserção de u .

3. Selecione u^* dentre os nós clientes não roteados com a melhor posição de inserção, ou seja, tal que:

$$c_2(i(u^*), u^*, j(u^*)) = \text{Max}[c_2(i(u), u, j(u))]$$

$$\text{em que } c_2(i, u, j) = \delta d(0, u) - c_1(i, u, j), \delta \geq 0$$

4. Insira o nó u^* na rota r entre $i(u^*)$ e $j(u^*)$, atualizando os tempos de início de serviço de todos os nós a partir de $j(u^*)$ e a capacidade do veículo.
5. Quando não existirem nós clientes cuja inserção na rota atual seja factível, inicie uma nova rota. A construção das rotas é finalizada quando todos os nós forem roteados, ou seja, não são impostas limitações para o número de veículos utilizados.

A heurística i de Solomon é aqui descrita, uma vez que a mesma foi utilizada em Pureza e Morabito (2008) como base para o desenvolvimento de um método para o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo com a opção de múltiplos entregadores. Naquele trabalho, os autores consideram limitações no número de veículos assim como no número de entregadores por veículo. A fim de considerar o impacto do número de entregadores no atendimento, o tempo de serviço em cada nó de parada dos veículos é dado por uma função inversamente proporcional ao número

de entregadores designados à rota.

Inicialmente, a heurística i é aplicada considerando-se um único entregador por rota. Caso ainda haja nós clientes não roteados, um entregador é adicionado temporariamente a cada rota, uma rota por vez. Ao incremento do número de entregadores em uma dada rota segue-se sua reprogramação; como resultado, os tempos de serviço são diminuídos abrindo possibilidades para que nós não roteados sejam inseridos na rota com a reaplicação da heurística de Solomon. A rota selecionada para receber o entregador é aquela cujo incremento no número de entregadores resulta na solução tentativa com maior ganho segundo a ordem lexicográfica – número de nós clientes roteados, número de veículos, número de entregadores, distância total. Caso nenhuma solução tentativa resulte em ganhos nenhum entregador é designado, e o número de entregadores é armazenado para que em um próximo teste, incrementos sejam aplicados a partir deles. O teste com incremento no número de entregadores é repetido até que todos os nós clientes sejam roteados ou até que o número máximo de entregadores tenha sido investigado em todas as rotas.

O algoritmo de Pureza e Morabito é mais formalmente descrito nos passos seguintes.

Passos da Heurística de Pureza e Morabito

1. Seja F o tamanho da frota, e P o conjunto de nós não roteados. Aplique a heurística i de Solomon com frota limitada e com um entregador em cada rota. Seja S a solução resultante com r rotas, e $crew_j$ o número de entregadores na rota j ($crew_j = 1, \forall j = 1..r$). Atualize P .
2. Se $P = \emptyset$, vá para o passo 4. Caso contrário:

Para cada rota j em S , faça:

- $trycrew_j$ (número de entregadores a ser testado na rota j) = $crew_j$ (número corrente de entregadores na rota j)
- $lastfail_j$ (ultimo tamanho de tripulação na rota j que falhou em melhorar a solução) = -1
- $trycrewI_j = trycrew_j$.

Faça também $fail = 0$ (número de rotas para as quais o tamanho máximo de tripulação $maxcrew$ já foi atingido ou testado).

3. Repita até que $fail = r$ ou $P = \emptyset$:

3.1. Faça T^* (melhor solução tentativa) = S .

3.2. Para cada rota j em S :

3.2.1. Se $(\max \{trycrew_j, lastfail_j + 1\} \leq maxcrew)$ e $(tcrew - 1 \geq 0)$ gere uma solução tentativa como se segue:

3.2.1.1. If $(lastfail_j < crew_j)$ (a última tentativa de aumentar o número de entregadores em j melhorou a solução), faça $trycrew_j = trycrew_j + 1$.

3.2.1.2. Caso contrário, se $(lastfail_j > crew_j)$ e $(lastfail_j + 1 \leq maxcrew)$, faça $trycrew_j = lastfail_j + 1$.

3.2.1.3. Faça $trycrewI_j = trycrew_j$ (armazene o tamanho de tripulação testado na rota j)

3.2.1.4. Reprograme a rota j com $trycrew_j$ entregadores na rota j .

3.2.1.5. Aplique a heurística de Solomon à solução S com vistas a incluir nós não roteados e obtenha uma solução tentativa T .

3.2.1.6. Se T melhora T^* , faça $T^* = T$.

3.2.1.7. Para cada rota j da solução S , faça $trycrew_j = crew_j$ (restaure os tamanhos de tripulação originais).

3.2.2. Caso contrário, faça $fail = fail + 1$.

3.3. Se $T^* = S$ (nenhuma melhoria foi obtida com a adição de um entregador em quaisquer rotas da solução S) faça $lastfail_j = trycrewI_j, \forall j$ (o último tamanho de tripulação na rota j que falhou em melhorar a solução é o tamanho de frota testado). Caso contrário, faça $S = T^*$, $crew_j =$ número de entregadores na rota j de T^* , e atualize P .

4. Retorne a solução S .

2.6 Sistemas de Roteamento Comerciais

O desenvolvimento de sistemas computacionais especializados em roteamento permitiu que o planejamento operacional de veículos pudesse ser realizado de forma automática e rápida, e integrado à operação diária. Estes *softwares* armazenam e disponibilizam, além dos dados e localização dos clientes, informações da malha viária, com sentido, direções possíveis, velocidades permitidas e restrições de tráfego. A partir desses dados, algoritmos heurísticos fornecem para cada veículo, a sequência de visitas e a programação dos horários de suas atividades. O resultado pode vir na forma de um relatório indicando o melhor trajeto, ou de um mapa com o mesmo conteúdo, ou ainda pelo simples ordenamento dos documentos (notas fiscais ou conhecimentos de frete) na sequência encontrada.

O número de *softwares* comerciais disponíveis no mercado aumentou muito nos últimos anos e, particularmente no Brasil, após a estabilização da economia. Dentre as razões apontadas para esta tendência nacional, destacam-se as crescentes exigências dos clientes relativas a prazos, datas e horários de atendimento (principalmente entregas); o agravamento dos problemas de trânsito, acesso, circulação e estacionamento de veículos

nos centros urbanos (principalmente caminhões); o aumento da competição pelo mercado e a busca de eficiência trazida pela eliminação da inflação; e o custo de capital levando à redução de estoques e ao aumento da frequência de entregas (CUNHA, 2000).

Hall e Partyka (1997) apresentam os resultados de uma pesquisa que identifica as principais características de 20 diferentes *softwares* de roteamento disponíveis no mercado até então. No mercado brasileiro, até alguns anos atrás havia apenas uma opção disponível de *software* de roteamento (Trucks, não referenciado no trabalho de Hall e Partyka). Logo após, outros *softwares* tornaram-se disponíveis, como Truckstops, RoadShow, RouteSmart e RoadNet, desenvolvidos por empresas estrangeiras e citados no levantamento de Hall e Partyka em 1997, além de alguns nacionais, como o RotaCerta.

As informações levantadas na pesquisa abrangem: o ano de lançamento de cada produto, as plataformas de processamento e requisitos mínimos de *hardware*; o número máximo de pontos de demanda, de veículos e de terminais que podem ser considerados; o preço, as possíveis interfaces com Sistemas de Informações Geográficas (SIG); se o *software* permite roteamento em nós e arcos, se há consideração de janelas de tempo rígidas (que não podem ser violadas) ou flexíveis (penalidade pela violação), e quais são as implantações mais significativas.

Os autores destacam que nenhuma avaliação do desempenho comparativo dos *softwares* foi realizada em relação à qualidade das soluções obtidas, à robustez e ao desempenho computacional. Enfatizam também a importância de rotas que podem ser alteradas em tempo real, quando os veículos já se encontram em rota, em função de novas solicitações de atendimento recebidas e que necessitam ser inseridas na programação de algum veículo.

Segundo Cunha (2000), no início da década diversos pacotes disponíveis no mercado brasileiro eram bastante sofisticados e eficientes em termos de recursos e possibilidades de consideração de diversos tipos de restrições, como também testados e validados em diferentes tipos de problemas. Porém, sua implantação exigia, em alguns casos, investimentos e recursos significativos, além de tempo para a preparação de bases de dados e treinamento para sua utilização até que estivessem em condições operacionais para a sua efetiva utilização nas empresas.

Um aspecto importante ressaltado pelo autor (CUNHA, 2000) é que embora a maioria dos modelos se propusesse a otimizar a roteamento, na prática nem sempre os algoritmos consideravam todas as parcelas dos custos de operação. Estes valores compreendiam desde os custos variáveis com a distância percorrida até os custos fixos dos veículos e custos horários da equipe (incluindo a utilização ou não de horas extras a fim de reduzir a necessidade de frota e a quilometragem percorrida).

Novas pesquisas realizadas sobre o desempenho e características dos *softwares* revelam mudanças significativas. Hall e Partyka (2008) constatam que o mapeamento, anteriormente realizado por SIG's, foi transferido para dados geográficos encontrados na Internet por meio de ferramentas especializadas como, por exemplo, o Mapquest e o Google Earth. A mobilidade é outra característica encontrada nos novos *softwares* de roteamento uma vez que a integração destes *softwares* com dispositivos portáteis é de grande utilidade para empresas. Nota-se também que os algoritmos utilizados nestes produtos são geralmente de propriedade do próprio fabricante e consistem de uma combinação de métodos de programação inteira e heurísticos.

No mesmo trabalho, Hall e Partyka apresentam um levantamento que avalia as seguintes funções de 16 *softwares* vigentes no mercado: plataforma, capacidade de algoritmos, interfaces e características, aplicativos, integração de sistemas e

informações gerais. Os autores observam que esses *softwares* (descritos na Tabela 2.1) apresentam um conjunto de capacidades em comum: a geocodificação de endereços, ou seja, a obtenção da latitude e longitude de um endereço a partir um banco de dados contido em mapas digitais; a determinação de melhores caminhos entre pares de nós geograficamente referenciados; a atribuição de escalas de paradas para rotas e terminais; o sequenciamento e roteamento de veículos entre os pontos de demanda, além de exibir resultados de forma gráfica e tabular, possibilitando que os operadores possam orientar o processo de resolução e comunicar os resultados aos motoristas e entregadores.

Tabela 2.1: Softwares de roteamento disponíveis no mercado.

Produto	Empresa	Ano de Introdução no Mercado
Descartes Routing & Scheduling	The Descartes Systems Group	
Direct Route	Appian Logistics Software, Inc.	1996
DISC	MJC2 Limited	1990
ILOG Dispatcher	ILOG, Inc.	1997
JOpt.SDK	DNA Evolutions	
Optrak4 Vehicle Routing & Scheduling	Optrak Distribution Software	2002
ORTEC Routing and Scheduling	ORTEC	1981
Paragon Routing and Scheduling System	Paragon Software Systems, Inc.	1997
Prophesy Total Transportation System	Prophesy Transportation Solutions	1999
PTM Pro Online, Pupil Transportation Manager	Spatial Decisions Support Systems	2003
REACT	MJC2 Limited	1990
Roadnet Anywhere	UPS Logistics Technologies	2006
Roadnet Transportation Suite	UPS Logistics Technologies	1983
STARS 5.0	SAITECH, Inc.	1995
StreetSync Desktop	RouteSolutions, Inc.	2005
The LogiX Suite	Distribution Planning Software Limited	1985
TourSolver for MapPoint / MapInfo Pro	Magellan Ingenierie	2002
TruckStops Routing and Scheduling Software	MicroAnalytics	1984

(Fonte: Hall e Partyka, 2008)

Apesar dos avanços dos *softwares* existentes no mercado, não há evidências que algum deles contemple o problema estudado neste trabalho, ou seja, situações que além do roteamento e programação dos veículos, seja também requerida a determinação do número de entregadores em cada rota. De fato, tanto quanto sabido, apenas o trabalho de Pureza e Morabito (2008) aborda a possibilidade de entregadores adicionais e, conforme discutido na seção 2.5, é dirigido ao roteamento de veículos com restrições de janela de tempo.

O capítulo a seguir apresenta a motivação prática que inspirou o presente trabalho.

CAPÍTULO 3 – A EMPRESA ESTUDADA

A expansão das fronteiras comerciais nas mais diversas áreas de negócios, notoriamente em ascensão atualmente, tem elevado os custos envolvidos na distribuição de produtos. O custo da distribuição até os clientes é, dentre os componentes logísticos, o maior, o mais importante estrategicamente e o mais sujeito a variações frequentes. Segundo Lima (2006), transportes representam 59,5% dos custos logísticos no Brasil.

Na distribuição em pontos de vendas de áreas urbanas com grande densidade demográfica, os tempos de atendimento dos clientes são relativamente grandes quando comparados ao tempo de viagem do veículo, o que geralmente implica que parte dos pedidos não pode ser entregue durante a jornada de trabalho do entregador. Se por um lado, a satisfação da jornada de trabalho implica no cumprimento apenas parcial dos pedidos diários (afetando o nível de serviço ao cliente), por outro lado, o cumprimento de todas as ordens de serviço diárias resulta na utilização de horas extras e, portanto, em custos logísticos adicionais. Esta situação foi, de fato, observada em uma empresa do setor de bebidas, conforme discutido a seguir.

3.1 A empresa estudada

A Companhia de Bebidas Ipiranga é uma empresa que opera há mais de 70 anos na região de Ribeirão Preto e sul do estado de Minas Gerais, atendendo mais de 300 cidades e abastecendo aproximadamente 30.000 postos de venda. Desde a sua fundação, produz e engarrafa produtos de The Coca Cola Company, tendo sido uma das primeiras franquias da multinacional no Brasil. A empresa oferece um *mix* de mais de 100 produtos entre águas, refrigerantes, cervejas, chás, energéticos e sucos.

O sistema de distribuição da empresa pode ser considerado representativo dentre as empresas que operam na comercialização e distribuição de bebidas. A demanda total diária da empresa é elevada (aproximadamente 400 cubagens), em particular, acarretando em muitas horas de trabalho para o atendimento das necessidades de áreas com maiores densidades demográficas. Os custos logísticos da empresa correspondem a cerca de 11% dos custos de produção finais dos produtos da empresa.

A rotina da empresa em relação ao atendimento ao cliente é dividida da seguinte maneira: pré-vendas, faturamento, elaboração de rotas, montagem das cargas (carregamento da frota) e entrega dos produtos. As próximas seções discutem, de forma breve, cada uma destas etapas.

3.1.1 Pré-vendas e faturamento

As rotas são elaboradas a partir dos pedidos gerados pelos consultores de vendas ao final de cada dia, sistema este conhecido como pré-venda; os consultores geram os pedidos, após visitarem todos os clientes, que são transmitidos até as 18:00 horas para o sistema da empresa, após o que, uma remessa é gerada. Os pedidos são, então, processados e validados pelo setor de faturamento. Com a validação, uma consulta no estoque é realizada para verificar se é possível atender todos os produtos solicitados pelos clientes.

3.1.2 Elaboração das rotas

Como dito anteriormente, as rotas são elaboradas a partir dos pedidos gerados pelos consultores ao final de cada dia. A entrega dos produtos é feita em um dia posterior, na maioria das vezes, no dia seguinte à coleta dos pedidos. O período para a

elaboração das rotas ocorre entre as 18:00 e 21:00 horas (após a coleta dos pedidos e antes do início do carregamento da frota). Com esses dados, os responsáveis pela geração das rotas especificam os clientes e a demanda de cada um deles. Os territórios atendidos (*strings*) são pré-estabelecidos, ou seja, as áreas de atendimento são definidas na malha viária de cada cidade, e a cada dia um grupo de territórios é atendido pelos entregadores.

As principais restrições presentes na elaboração das rotas são:

- Disponibilidade de veículos da frota para efetuar a entrega
- Capacidade de carga dos veículos disponíveis
- Disponibilidade no estoque dos produtos solicitados pelos clientes (quantidade e *mix*)
- Disponibilidade de tempo para o entregador realizar as entregas dos produtos

A empresa possui frota própria com 44 veículos (formada por peruas, caminhões de seis, oito e dez portas e carreta) e dimensionada para atender a demanda diária total do mercado, considerando a sazonalidade existente para esse tipo de produto. Com isso, os veículos utilizados na distribuição estão cadastrados no sistema, incluindo características como cubagem (capacidade de transporte), entre outras.

A geração de rotas é realizada por um sistema comercial de roteamento. O *software* possui uma base de dados que reúne informações de toda a malha viária das regiões atendidas, tais como condições das ruas, distâncias entre pontos, velocidade média adotada para os veículos, velocidade máxima permitida na via, mãos de direção, e horários de congestionamento. Todos os dados dos clientes da empresa também são cadastrados no sistema, incluindo suas localizações na malha viária. A velocidade da

cada cliente atendido, contato inicial com o cliente e recebimento da nota fiscal referente à venda efetuada no dia anterior (o pagamento pela venda é realizado diretamente ao motorista do veículo, que é responsável também pela conferência dos pedidos e devoluções), e saída do cliente (incluindo o retorno ao veículo e o seu carregamento com vasilhames vazios). O valor destes tempos é fixo e totaliza 15 minutos (valor médio estabelecido pela empresa), os quais são somados ao tempo total da rota, incluindo o tempo de atendimento ao cliente que é variável e dependente da demanda.

O *software* da empresa também designa os motoristas a cada veículo da frota. A frota da empresa é heterogênea e em determinadas áreas somente podem ser enviados determinados tipos de veículos devido a restrições para a distribuição; por exemplo, em algumas regiões a distribuição pode ser feita somente por veículos de pequeno porte conforme estabelecido pelos órgãos responsáveis pelo tráfego nas cidades. Esta situação surge principalmente em áreas urbanas de grandes cidades, onde há limitações de estacionamento de caminhões para entrega ou coleta. Por essa razão, os veículos disponíveis para cada território são especificados antes do início da elaboração da rota.

Após o processo de roteamento, uma ordem de carregamento é emitida para a estiva, área responsável pela separação das cargas com o *mix* dos produtos e pelo carregamento da frota.

3.1.3 Montagem das cargas e entrega dos produtos

O procedimento de montagem das cargas é feito manualmente a partir das 21:00 horas do dia anterior à distribuição. Na montagem, não se considera cada pedido individualmente, isto é, a carga do veículo é feita conhecendo-se o *mix* de produtos e a quantidade de cada produto listada para atender aos clientes da rota.

A sequência de entrega adotada em cada rota nem sempre é aquela especificada pelo *software* da empresa, uma vez que os motoristas podem escolher qual cliente deve ser atendido primeiramente, demonstrando que a rota percorrida não é a que possui menor custo, menor distância ou menor tempo. O sequenciamento da rota não é fornecido aos motoristas, mas sim um mapa com os clientes a serem atendidos, que é entregue aos motoristas na saída do veículo para atendimento. Em outras palavras, essas decisões são tomadas pelos motoristas, que possuem autonomia para isso.

O carregamento (quantidade de caixas) do veículo também é fornecido. Os motoristas recebem as notas fiscais que devem ser entregues no atendimento, nas quais constam os dados dos clientes.

Como o motorista tem grande conhecimento da região que realiza os atendimentos e dos clientes que devem ser atendidos, a cada grupo de clientes próximos entre si ele seleciona um ponto de parada para o veículo, e inicia o atendimento a cada cliente do grupo em questão. Não há definição de um ponto de parada específico devido às vagas disponíveis para estacionar o veículo não serem sempre as mesmas, porém o motorista escolhe um ponto em que as distâncias entre os clientes e o veículo sejam próximas, uma vez que o atendimento aos clientes é feito a pé.

Na maioria das vezes, o tempo total de execução da rota excede o tempo máximo estabelecido devido à política da empresa pelo atendimento de todas as ordens emitidas. Essa violação confronta um aspecto importante que é a jornada de trabalho das equipes que realizam a distribuição (carga horária de trabalho limitada a dez horas diárias).

Mais recentemente, a empresa começou a realizar experiências nas quais um ou mais funcionários (entregadores) são designados a algumas rotas, para auxiliar o motorista e reduzir o tempo de serviço nos pontos de demanda, e conseqüentemente, no

tempo total de rota. Como a adição de entregadores implica em maiores gastos para a empresa com folha de pagamento, é importante que este número seja mínimo. Entretanto, as experiências da empresa vêm sendo feitas de forma limitada, não sistematizada, sendo a escolha da rota e do número de entregadores realizada de forma intuitiva.

Neste sentido, o presente trabalho propõe uma metodologia heurística para a designação sistemática do número de entregadores em cada rota. O método leva em conta que o número mínimo de entregadores necessários para cada rota é dependente, dentre outros fatores, das demandas totais dos clientes associados a cada ponto de parada.

A descrição do método proposto para a melhoria do processo de distribuição da empresa estudada e de sua aplicação a um pequeno exemplo são apresentadas no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4 – UMA EXTENSÃO DO ALGORITMO DE CLARKE E WRIGHT PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS COM DESIGNAÇÃO DE ENTREGADORES EXTRAS

O PRV com designação de entregadores extras visa a definição de rotas de atendimento de n clientes dispersos em determinada região em situações em que um único entregador por veículo provocaria a violação do tempo máximo de uma ou mais rotas. Na heurística proposta, janelas de tempo não são consideradas para início do serviço, e o atendimento é realizado por uma frota homogênea de tamanho limitado que parte e retorna a um único depósito. Além disso, para cada veículo, a equipe escalada em cada veículo está limitada a um tamanho máximo, a fim de considerar restrições de espaço na cabine do veículo. O objetivo do problema é o de minimizar o número de clientes planejados e não atendidos durante a jornada de trabalho com o menor custo possível.

Assim, a partir das características acima, pretende-se reduzir o tempo de atendimento em cada rota através da designação de entregadores à rota. Primeiramente, a criação das rotas é efetuada pelo algoritmo de Clarke e Wright (CW), descrito na seção 2.3.1 do Capítulo 2. Se o número de veículos requeridos for superior ao tamanho da frota (existem pontos de demanda não atendidos durante a jornada de trabalho), são realizados testes de designação de um entregador extra a cada rota individualmente, reaplicando o algoritmo CW, e selecionada a designação com melhor resultado. A designação de entregadores extras diminui o tempo de serviço nos nós de cada rota, favorecendo o aumento do número de junções de rotas no algoritmo CW. A maior quantidade de rotas unidas reduz o número dos veículos necessários, ocasionando o aumento do número de clientes atendidos.

A descrição dos passos da extensão do algoritmo CW (CW_{ext}) é apresentada a seguir.

Dados de entrada: Constantes

n : número de clientes (pontos de parada) a serem visitados

NV : frota disponível

T : tempo máximo de rota

C : capacidade de cada veículo

NS : número máximo de entregadores em cada rota (tripulação máxima)

Índices

i, j : clientes ou depósito ($i, j = 1$ (depósito); $i, j = 2 \dots n$ (clientes))

k : número de rotas ($k = 1 \dots n$)

Dados de entrada: Vetores e Matrizes

d_i : demanda do cliente i

$l(i, j)$: distância entre os nós i e j

$t_s(i)$: tempo de serviço no cliente i

t_{ij} : tempo de deslocamento entre os clientes i e j

Incógnitas: Variáveis e Matrizes

r : número de rotas correntes ($r = 1 \dots n$)

$Sav(i, j)$: economia em distância ao unir i e j na mesma rota

$server[k]$: número de entregadores designados à rota k em soluções tentativa, $server[k] = 1 \dots NS$

$server_s(k)$: número de entregadores designados à rota k na solução corrente,

$$server_s[k] = 1 \dots NS$$

$tentativa[k]$: último número de entregadores testado para designação à rota k

1. Faça $r = N$, $tentativa[k] = 0$ e $server[k] = 0$ ($k = 1..r$). Seja S a solução resultante, onde cada rota é designada a um único cliente.
2. Enquanto ($r > NV$) e ($tentativa[k] < NS$ para algum $k = 1..r$) e ($server(k) < NS$ para algum $k = 1..r$):
 - 2.1. Faça $server_s[k] = server[k]$, ou seja, armazene o número de entregadores da solução corrente S .
 - 2.2. Para $k = 1..r$:
 - 2.2.1. Faça $server[k] = server[k] + 1$, ou seja, designe um entregador adicional à rota k .
 - 2.2.2. Calcule a programação e o tempo total da rota.
 - 2.2.3. Aplique o algoritmo CW do passo 2 ao passo 4 daquele algoritmo, obtendo a solução tentativa St_k .
 - 2.3. Seja Rt_k a rota resultante da união de rotas em St_k para todo k .
 - 2.4. Se $Rt_k = \emptyset$ (não houve união de nenhum par de rotas), faça $tentativa[k] = server[k]$ para $\forall k = 1..r$.
 - 2.5. Caso contrário, se $Rt_k \neq \emptyset$ ou se o número de entregadores na rota for maior que um, selecione a rota Rt_k (com o número de entregadores incrementado) que atende o maior número de clientes e a solução St_k associada a ela. Faça $S = St_k$, obtendo uma nova solução corrente.
3. Se $r > NV$, selecione as NV rotas com o maior número de clientes para compor a solução final S^* . Os clientes das ($r - NV$) rotas restantes não são atendidos.

Note que o algoritmo afere a mesma prioridade a todos os clientes. Em caso de clientes prioritários, os critérios de seleção de rotas poderiam ser modificados para considerar esta possibilidade.

Caso a solução obtida no passo 3 não inclua todos os clientes e o sistema permita alguma violação do tempo de rota, o algoritmo pode incluir os seguintes passos adicionais:

4. Se a relaxação de restrição do tempo de rota ainda não foi realizada:

4.1. Relaxe as restrições nos limites permitidos.

4.2. Faça $tentativa[k] = 0$ para toda rota $k = 1..r$ e retorne ao passo 2.

A Figura 4.1 ilustra a aplicação de alguns passos relevantes do algoritmo CW_{ext} .

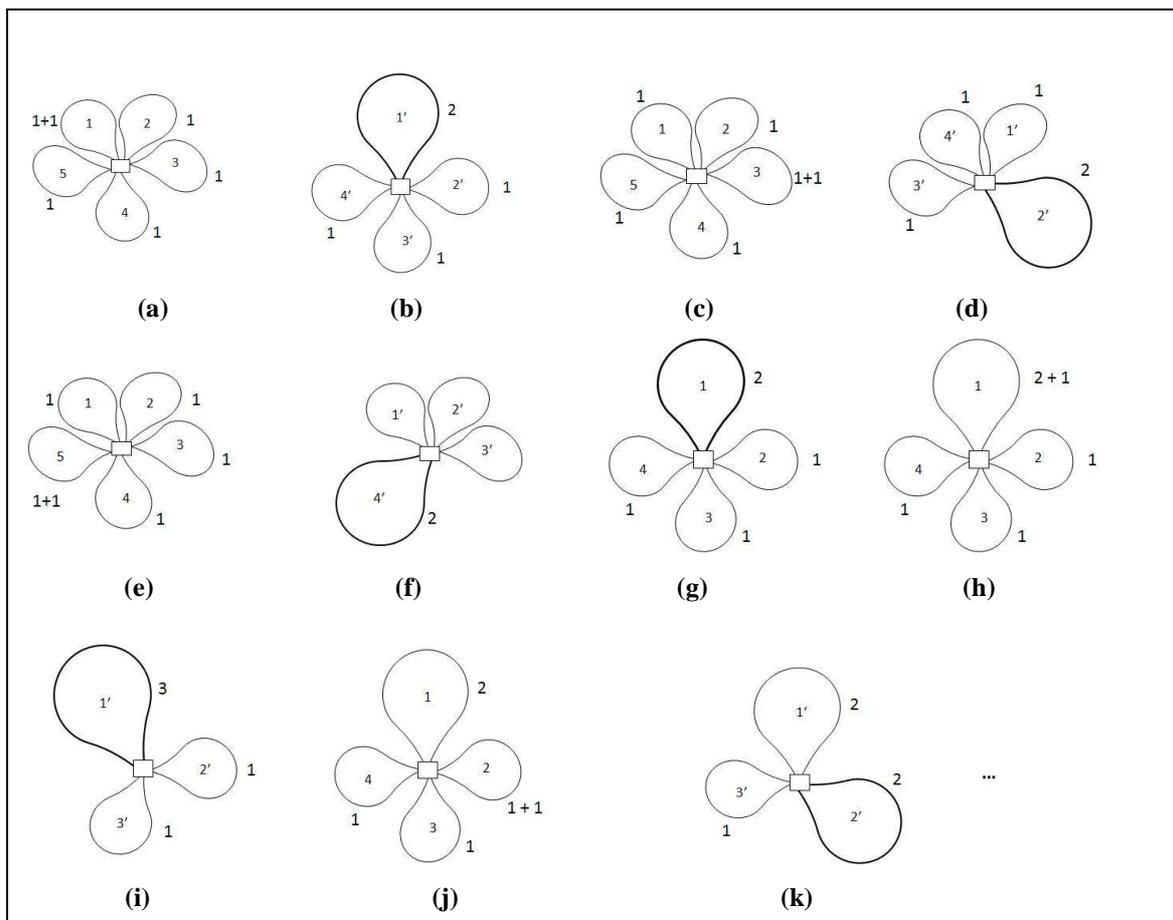


Figura 4.1: Ilustração de passos da extensão do algoritmo de Clarke e Wright (CW_{ext})

A ilustração apresentada na Figura 4.1 ocorre a partir de uma solução corrente de rotas com um entregador. Em 4.1(a) verifica-se a designação temporária de um entregador adicional à rota corrente 1. Considera-se, na ilustração, a mesma união de rotas (1 e 2) para a designação de entregadores à rota 2. Nota-se em 4.1(b) a rota resultante da designação de um entregador à rota 1 e em 4.1(c), a designação temporária de um entregador adicional à rota corrente 3. Neste caso, considera-se a mesma união de rotas (3 e 4) para a designação de entregadores à rota 4. Em 4.1(d) observa-se a rota resultante da designação de um entregador à rota 3, em 4.1(e), a designação temporária de um entregador adicional à rota corrente 5 e em 4.1(f), a rota resultante da designação de um entregador à rota 5. Após união de rotas, seleção da rota com maior número de clientes atendidos (em negrito) – Figura 4.1(g). Em 4.1(h) ocorre a designação

temporária de um entregador adicional à rota corrente 1 e em 4.1(i) verifica-se a rota resultante da designação de um entregador à rota 1. Designação temporária de um entregador adicional à rota corrente 2 observada em 4.1(j) e em 4.1(h) tem-se a rota resultante da designação de um entregador à rota 2. A sequência de tentativas para a designação de entregadores ocorre até que o número máximo de entregadores possíveis para designação em cada rota seja testado.

4.1 Exemplo de Aplicação de CW_{ext}

A fim de ilustrar o funcionamento do algoritmo CW_{ext} , gerou-se um pequeno exemplo a partir de dados extraídos da instância “r101”, proposta em Solomon (1987). O exemplo consiste dos 13 primeiros nós (que incluem o depósito), e dois veículos com capacidade igual a 250 kg.

O tempo máximo de rota (T_v) foi fixado em 480 minutos e o número máximo de entregadores em cada rota (NS) é definido como 3. Note que neste número está incluso o motorista, uma vez que ele também participa das entregas. Além disso, admite-se que a velocidade de deslocamento de todos os veículos é constante e igual a 60 km horários. Para o cálculo dos tempos de serviço em cada cliente i (ponto de parada), utilizou-se a seguinte função:

$$t_s(i) = \text{mínimo}(\text{tempo máximo de rota} - 2 * l[0, i], \varphi * d_i)$$

Em que φ é uma constante com dimensão tempo/unidade de demanda. Para o exemplo considerado, foi utilizado $\varphi = 2$ min/kg.

Note que, a princípio, o tempo de serviço calculado é proporcional à demanda (d_i) do ponto de parada i . Em outras palavras, quanto maior a demanda, maior o tempo de serviço. Entretanto, o tempo de serviço é também limitado pelo tempo necessário

para o deslocamento do veículo a partir do depósito e seu retorno, de forma a garantir que qualquer cliente possa ser servido com um veículo exclusivo sem violar a restrição de tempo máximo de rota.

É importante ressaltar que a função acima é válida para pontos de parada servidos em rotas com um único entregador, ou seja, somente com o motorista. Se o número de entregadores em uma rota for maior que um, o valor de $t_s(i)$ é simplesmente dividido pelo número de entregadores.

Os tempos de serviços e demais dados do problema são descritos nas Tabelas 4.1 a 4.3. A Tabela 4.1 apresenta as coordenadas cartesianas x e y , a demanda, e tempos de serviços de cada nó i . A Tabela 4.2, por sua vez, mostra as distâncias (ou tempos de deslocamento) computadas entre quaisquer pares de nós do exemplo. A distribuição dos nós no plano e em escala é ilustrada na Figura 4.2.

Tabela 4.1: Dados dos nós no exemplo ilustrativo.

i	x_i	y_i	d_i	$ts(i)$ (min)
0	35	35	0	0
1	41	49	55	110
2	35	17	38	76
3	55	45	29	58
4	55	20	80	160
5	15	30	74	148
6	25	30	15	30
7	20	50	67	134
8	10	43	26	52
9	55	60	40	80
10	30	60	18	36
11	20	65	32	64
12	30	25	180	360

Tabela 4.2: Distância ou tempo de viagem entre pares de nós i e j no exemplo ilustrativo.

		j												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
i	0	0.00	15.23	18.00	22.36	25.00	20.62	11.18	21.21	26.25	32.02	25.50	33.54	11.18
	1	15.23	0.00	32.56	14.56	32.20	32.20	24.84	21.02	31.58	17.80	15.56	26.40	26.40
	2	18.00	32.56	0.00	34.42	20.22	23.85	16.40	36.25	36.07	47.42	43.29	50.29	9.43
	3	22.36	14.56	34.41	0.00	25.00	42.72	33.54	35.36	45.04	15.00	29.15	40.31	32.02
	4	25.00	32.20	20.22	25.00	0.00	41.23	31.62	46.10	50.54	40.00	47.17	57.01	25.50
	5	20.62	32.20	23.85	42.72	41.23	0.00	10.00	20.62	13.93	50.00	33.54	35.36	15.81
	6	11.18	24.84	16.40	33.54	31.62	10.00	0.00	20.62	19.85	42.43	30.41	35.36	7.07
	7	21.21	21.02	36.25	35.36	46.10	20.62	20.62	0.00	12.21	36.40	14.14	15.00	26.93
	8	26.25	31.58	36.07	45.04	50.54	13.93	19.85	12.21	0.00	48.10	26.25	24.17	26.91
	9	32.02	17.80	47.42	15.00	40.00	50.00	42.43	36.40	48.10	0.00	25.00	35.36	43.01
	10	25.50	15.56	43.29	29.15	47.17	33.54	30.41	14.14	26.25	25.00	00.00	11.18	35.00
	11	33.54	26.40	50.29	40.31	57.01	35.36	35.36	15.00	24.17	35.36	11.18	00.00	41.23
	12	11.18	26.40	9.43	32.02	25.50	15.81	7.07	26.93	26.91	43.01	35.00	41.23	00.00

**Figura 4.2: Distribuição geográfica dos nós no exemplo ilustrativo.**

A seção seguinte ilustra a resolução do exemplo com o algoritmo proposto e a comparação da solução resultante com aquela obtida com o algoritmo CW.

4.1.1 Aplicação do algoritmo CW_{ext}

Passo 1: O algoritmo é inicializado, fazendo-se $tentativa[k] = 0$ para cada rota k ($k = 1..r$). Neste momento, r é igual ao número de clientes (cada rota está associada a um único cliente), e o número de entregadores em cada rota é igual a 0. Seja S a solução resultante, a qual consiste de n “rotas” (clientes) sem atendimento.

Passos 2.1 a 2.2: Como o número de rotas ($r = 12$) é superior ao tamanho da frota ($r > NV$), o número de entregadores em cada rota ($server[k] = 0$ para $\forall k = 1..r$) não excede a tripulação máxima ($server[k] < NS$), e o número de entregadores já testados em cada rota ($tentativa[k] = 0$) não excede a tripulação máxima ($tentativa[k] < NS$), armazena-se o número de entregadores corrente ($server_s[k] = server[k] = 0$) e adiciona-se um entregador à rota k ($server[k] = 1$). Com isso, os n clientes passam a ser atendidos na solução corrente S . Em seguida, o algoritmo CW é então aplicado. Inicialmente, obtêm-se os seguintes valores de economias resultantes da união de cada par de clientes i e j :

Tabela 4.3: Economias da união dos nós i e j em uma única rota.

		j											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
i	1	0.00	0.67	23.03	8.03	3.64	1.57	15.42	9.91	29.44	25.17	22.37	0.01
	2	0.67	0.00	5.95	22.78	14.76	12.78	2.96	8.18	2.59	0.21	1.25	19.75
	3	23.03	5.95	0.00	22.36	0.26	0.00	8.22	3.57	39.38	18.70	15.59	1.52
	4	8.03	22.78	22.36	0.00	4.38	4.56	0.12	0.71	17.02	3.33	1.53	10.69
	5	3.64	14.76	0.26	4.38	0.00	21.80	21.21	32.94	2.63	12.57	18.80	15.98
	6	1.57	12.78	0.00	4.56	21.80	0.00	11.78	17.58	0.77	6.26	9.37	15.29
	7	15.42	2.96	8.22	0.12	21.21	11.78	0.00	35.26	16.83	32.57	39.75	5.47
	8	9.91	8.18	3.57	0.71	32.94	17.58	35.26	0.00	10.16	25.50	35.62	10.52
	9	29.44	2.59	39.38	17.02	2.63	0.77	16.83	10.16	0.00	32.51	30.20	0.18
	10	25.17	0.21	18.70	3.33	12.57	6.26	32.57	25.50	32.51	0.00	47.86	1.68
	11	22.37	1.25	15.59	1.53	18.80	9.37	39.75	35.62	30.20	47.86	0.00	3.49
	12	0.01	19.75	1.52	10.69	15.98	15.29	5.47	10.52	0.18	1.68	3.49	0.00

O par de nós com a maior economia associada (nós 10 e 11) é então selecionado para união de suas rotas. Como resultado, o número de rotas é reduzido para 11. O processo é repetido iterativamente até que nenhuma união adicional de rotas seja possível, seja por limitações do tempo de rota como por limitações de capacidade dos veículos. A Figura 4.3 ilustra a solução resultante (S_t), incluindo o tempo total de cada rota k (Tv_k) e a capacidade utilizada no veículo (Cv_k). S_t apresenta um número de 3 rotas em excesso, ou seja, na melhor das hipóteses, 5 clientes (das menores rotas) não são atendidos durante a jornada de trabalho.

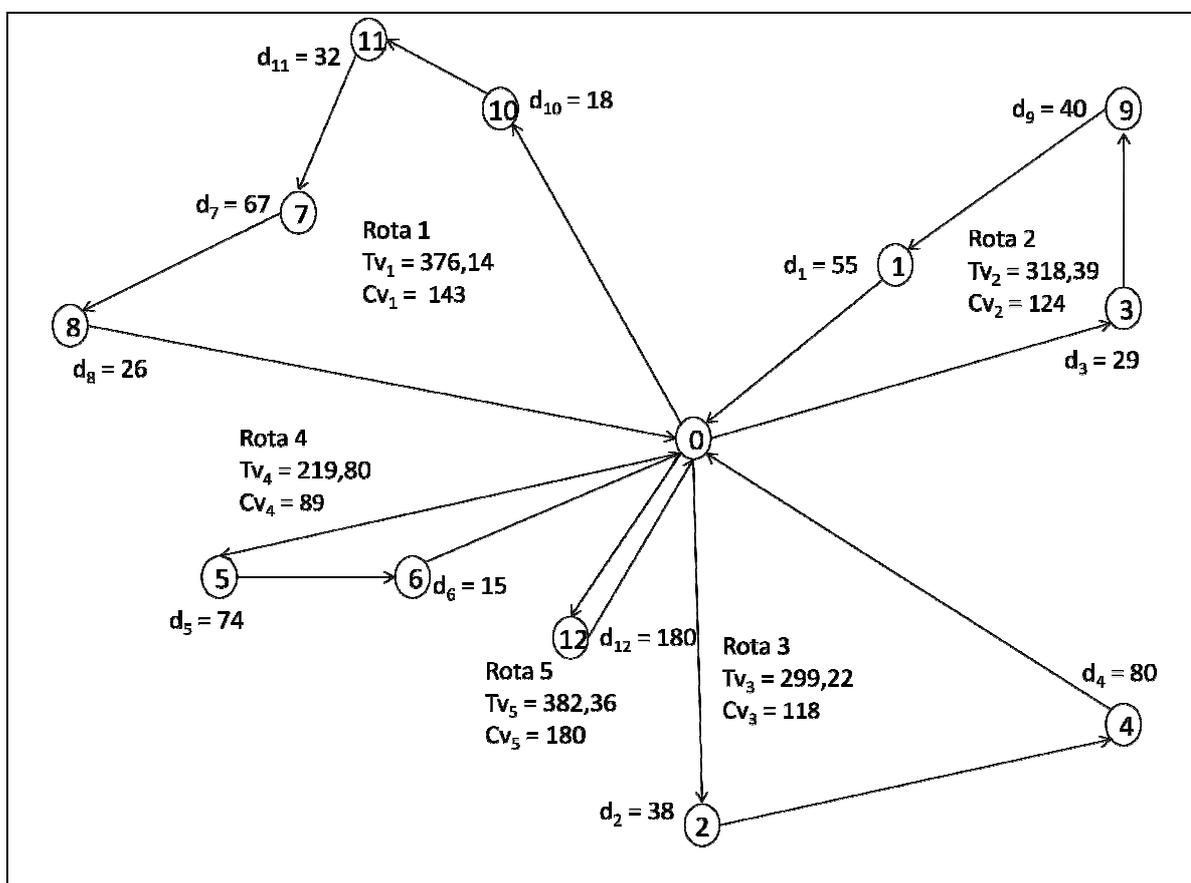


Figura 4.3: Conjunto de 5 rotas para a solução S , com $server[k] = 1$, para $k = 1..5$.

Passo 2.3: Cada designação de entregadores gera um conjunto de rotas resultantes da união de rotas (Rt_k) em St_k . Neste momento, a solução resultante é mostrada na Figura 4.3.

Neste momento, os valores dos elementos dos vetores $server[k]$, $tentativa[k]$ e o número de clientes servidos em cada rota k são os seguintes:

k	server[k]	tentativa[k]	Nº de clientes
1	1	1	4
2	1	1	3
3	1	1	2
4	1	1	2
5	1	1	1

Passos 2.1 a 2.2: O número de rotas ($r = 5$) é ainda superior ao tamanho da frota ($r > NV$), o número de entregadores em cada rota não excede a tripulação máxima ($server[k] < NS$), e o número de entregadores testados em cada rota não excede a tripulação máxima ($tentativa[k] < NS$). Com isso, armazena-se o número de entregadores corrente ($server_s[k] = server[k]$) e adiciona-se um entregador para cada rota individualmente.

Passo 2.3: Cada designação de entregadores gera um conjunto de rotas resultantes da união de rotas (Rt_k) em St_k .

As rotas resultantes são apresentadas nas figuras abaixo.

A Figura 4.4 representa a designação de 2 entregadores à rota 1, gerando a união das rotas 1 e 4. Considera-se a mesma união de rotas (1 e 4) para a designação de entregadores à rota 4, ou seja, $St_1 = St_4$.

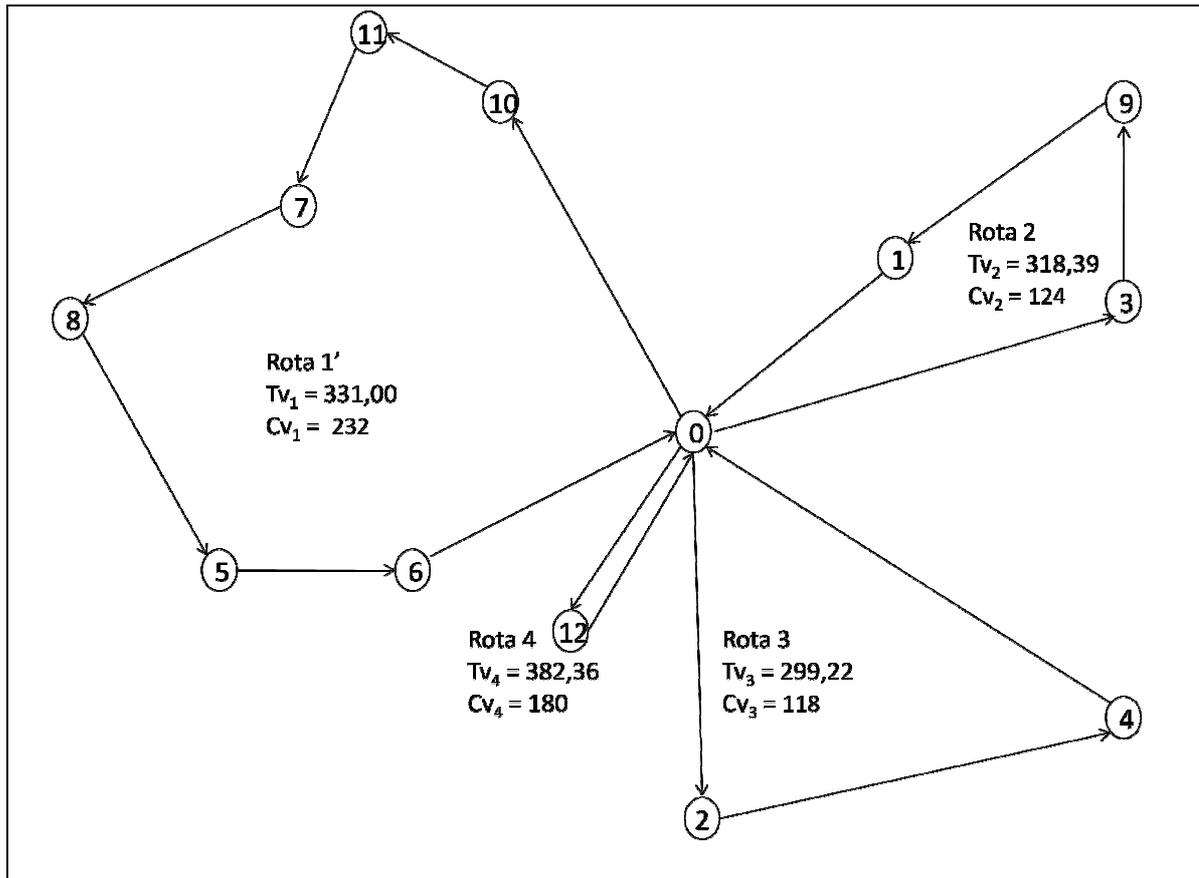


Figura 4.4: Designação de entregadores à rota 1 (4), com $server[1] = 2$.

A rota 1 volta à sua condição inicial (Figura 4.3). Em seguida, designam-se de 2 entregadores à rota 2, gerando a união das rotas 2 e 3 como apresentado na Figura 4.5. Considera-se a mesma união de rotas (2 e 3) para a designação de entregadores à rota 3, ou seja, $St_2 = St_3$.

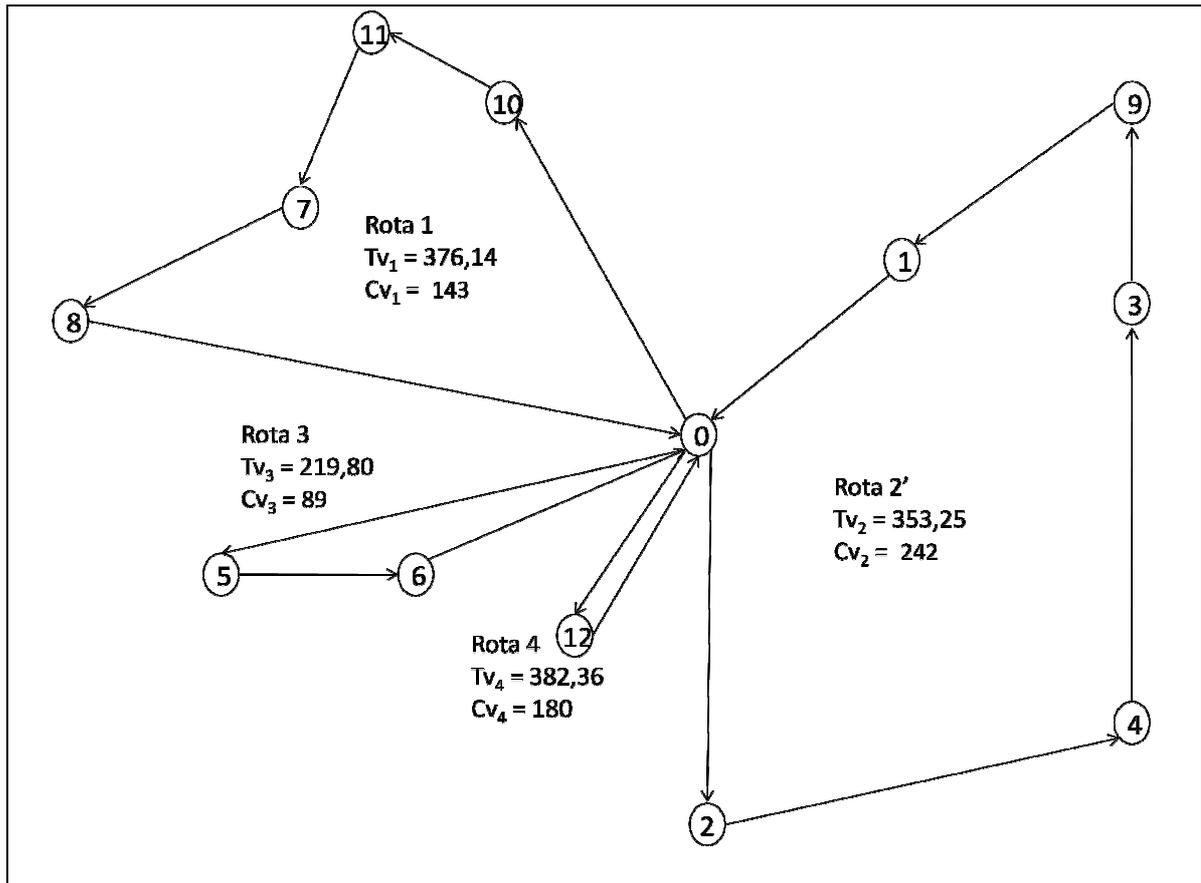


Figura 4.5: Designação de entregadores à rota 2 (3), com $server[2] = 2$.

A rota 2 volta à sua condição inicial (Figura 4.3). Em seguida, designam-se de 2 entregadores à rota 5, gerando a união das rotas 3 e 5, como apresentado na Figura 4.6.

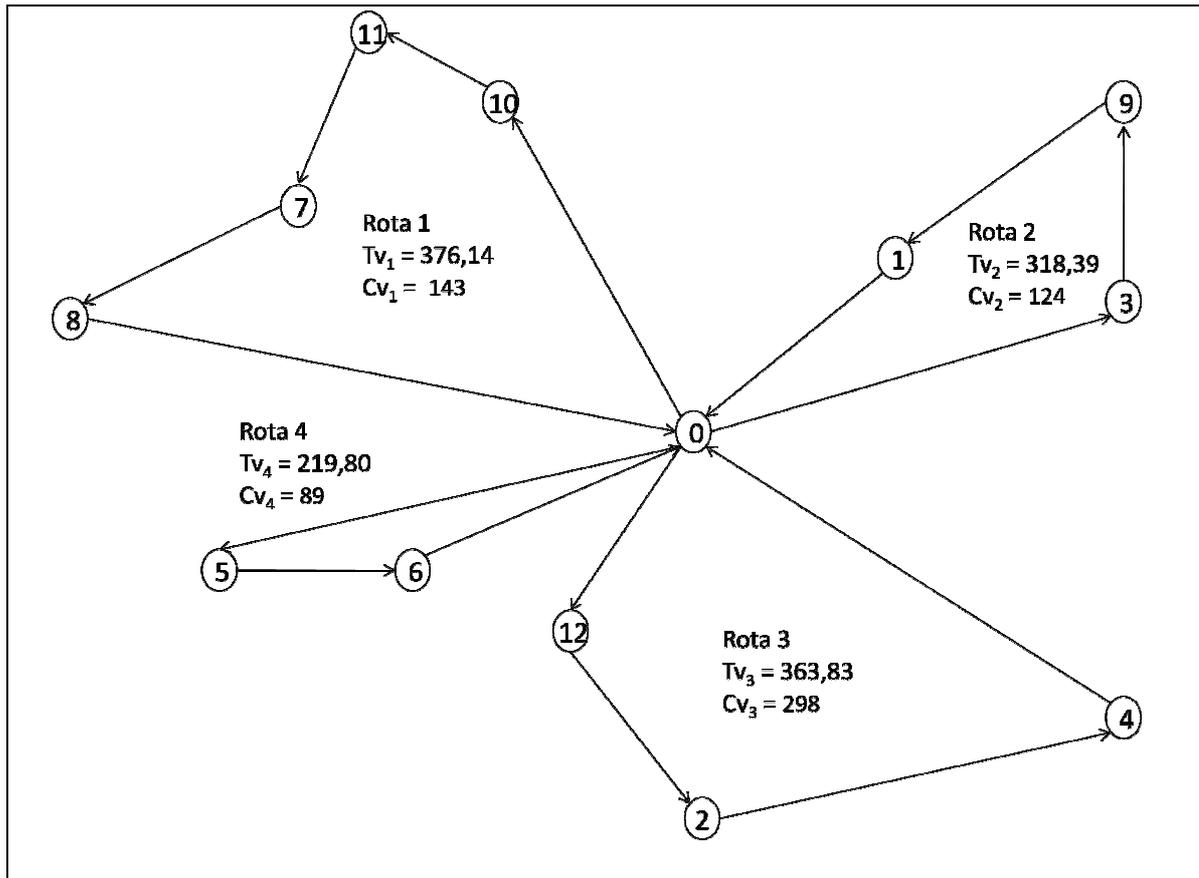


Figura 4.6: Designação de entregadores à rota 5 (3), com $server[5] = 2$.

A rota 5 volta à sua condição inicial como mostrado anteriormente na Figura 4.3.

Passo 2.4: O conjunto de rotas resultantes da união de rotas de S é não vazio ($Rt_k \neq \emptyset$), ou seja, houve alteração na solução no passo 2.3. Com isso, selecionou-se a rota Rt_k que atendeu o maior número de clientes ($Rt_1 = Rt_4$) e a solução St_1 associada a ela. Portanto, a solução corrente é dada pela Figura 4.7 abaixo:

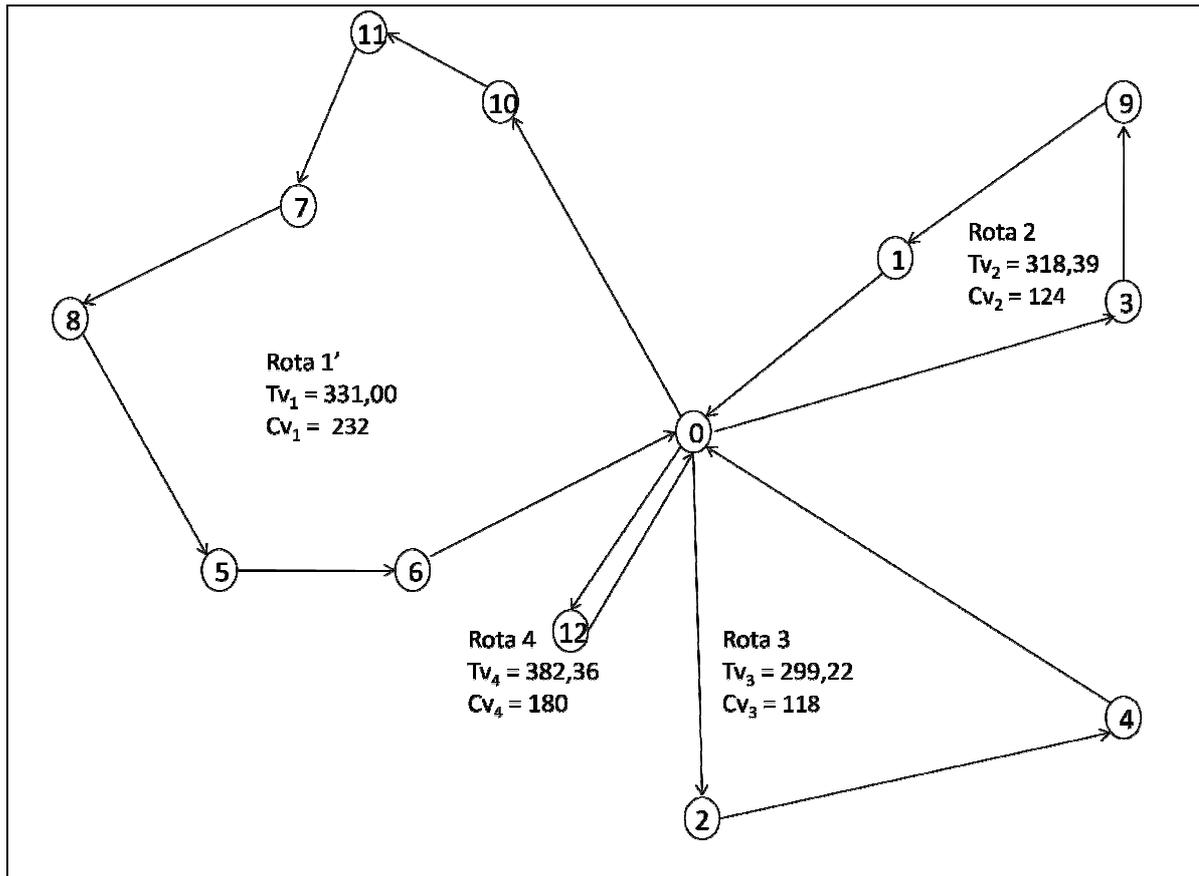


Figura 4.7: Solução $S = St_1$.

Neste momento, os valores dos elementos dos vetores $server[k]$, $tentativa[k]$ e o número de clientes servidos em cada rota k são os seguintes:

k	server[k]	tentativa[k]	Nº de clientes
1	2	2	6
2	1	2	3
3	1	2	2
4	1	2	1

Passos 2.1 a 2.2: O número de rotas ($r = 4$) é ainda superior ao tamanho da frota ($r > NV$), o número de entregadores em cada rota não excede a tripulação máxima ($server[k] < NS$), e o número de entregadores testados em cada rota não excede a tripulação máxima ($tentativa[k] < NS$). Com isso, armazena-se o número de entregadores corrente ($server_s[k] = server[k]$) e adiciona-se um entregador para cada rota individualmente.

Passo 2.3: Cada designação de entregadores gera um conjunto de rotas resultantes da união de rotas (Rt_k) em St_k .

Na designação de 3 entregadores à rota 1 não houve união de rotas, somente a diminuição do tempo de rota como apresentado na Figura 4.8.

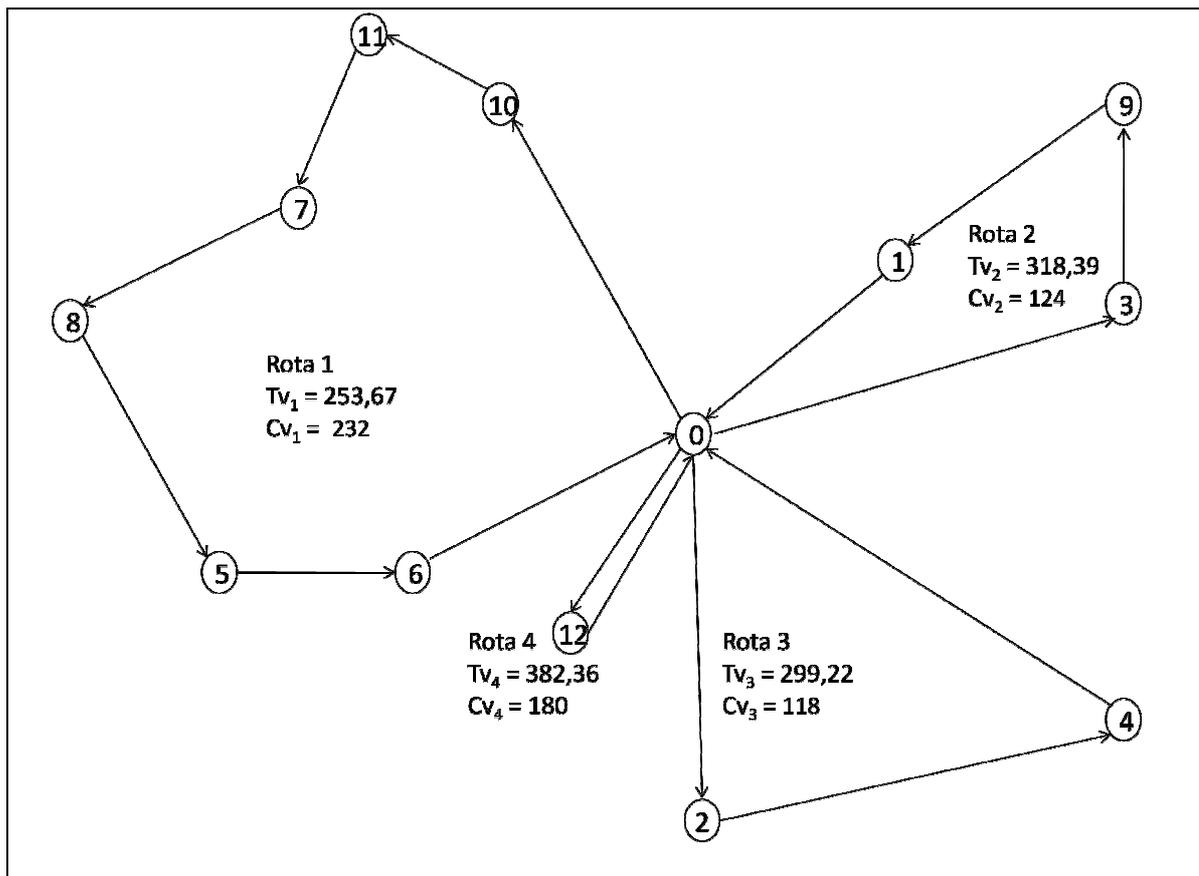


Figura 4.8: Designação de entregadores à rota 1 (4), com $server[1] = 3$.

A rota 1 volta à sua condição inicial (Figura 4.7). Em seguida, designam-se de 2 entregadores à rota 2, gerando a união das rotas 2 e 3, como apresentado na Figura 4.9. Considera-se, novamente, $St_2 = St_3$.

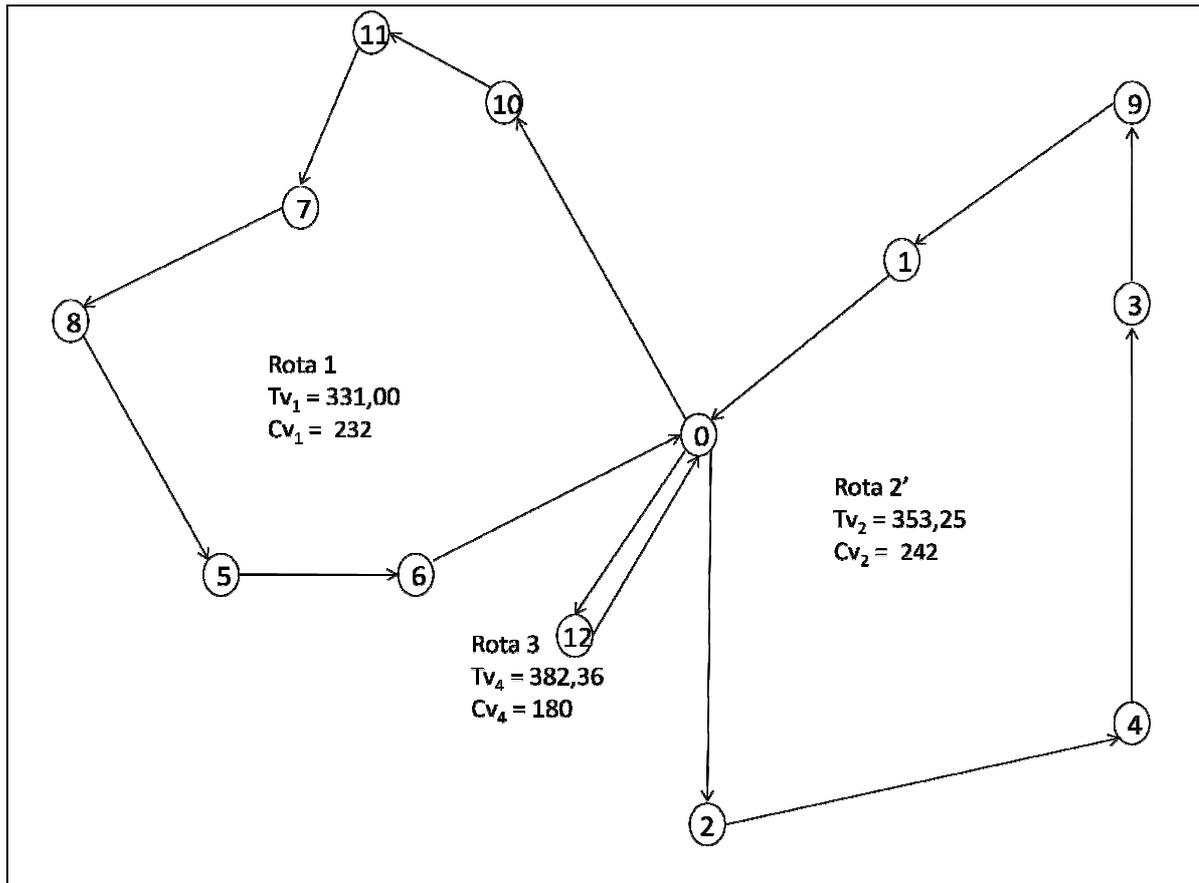


Figura 4.9: Designação de entregadores à rota 2 (3), com $server[2] = 2$.

A rota 2 volta à sua condição inicial (Figura 4.7). Em seguida, designam-se de 2 entregadores à rota 4, gerando a união das rotas 3 e 4, visto na Figura 4.10.

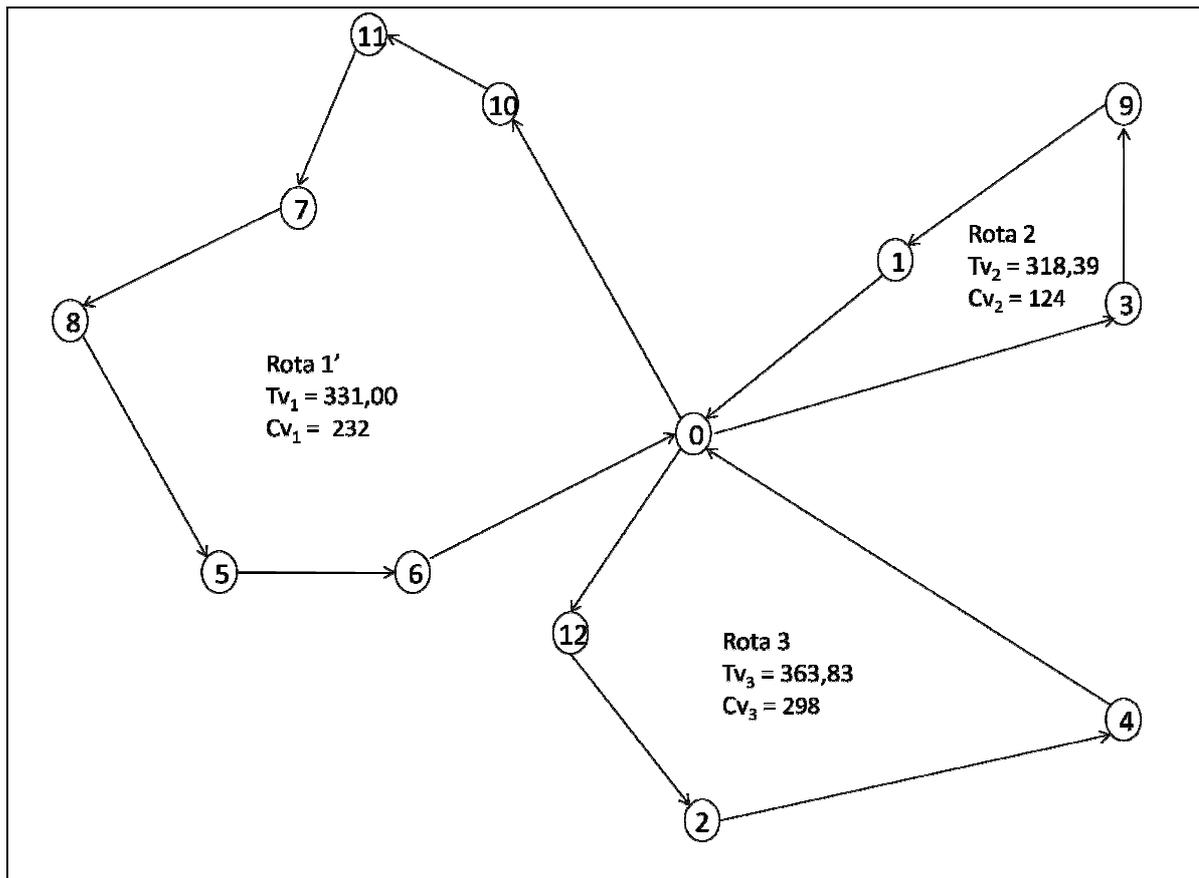


Figura 4.10: Designação de entregadores à rota 4 (3), com $server[5] = 2$.

A rota 4 volta à sua condição inicial como mostrado anteriormente na Figura 4.7.

Passo 2.4: O conjunto de rotas resultantes da união de rotas de S é não vazio ($Rt_k \neq \emptyset$), ou seja, houve alteração na solução no passo 2.3. Com isso, selecionou-se a rota Rt_k que atendeu o maior número de clientes ($Rt_2 = Rt_3$) e a solução St_2 associada a ela. Portanto, a solução corrente é dada pela Figura 4.11 abaixo:

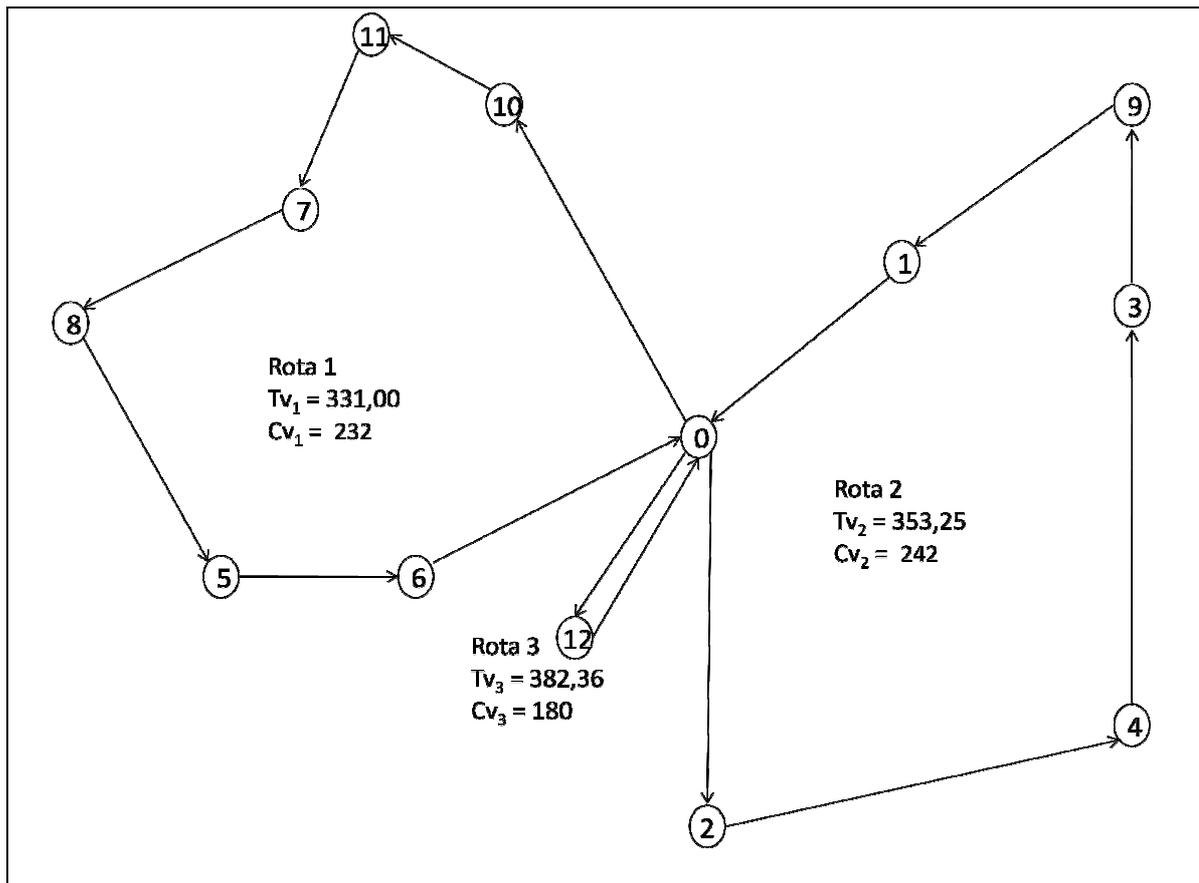


Figura 4.11: Solução $S = St_2$.

Neste momento, os valores dos elementos dos vetores $server[k]$, $tentativa[k]$ e o número de clientes servidos em cada rota k são os seguintes:

k	$server[k]$	$tentativa[k]$	Nº de clientes
1	2	3	6
2	2	2	5
3	1	2	1

A rota 1 já foi testada com o número máximo de entregadores permitido, portanto não haverá mais acréscimo de entregadores nesta rota.

Passos 2.1 a 2.2: O número de rotas ($r = 3$) é ainda superior ao tamanho da frota ($r > NV$), o número de entregadores em cada rota não excede a tripulação máxima ($server[k] < NS$), e o número de entregadores testados em cada rota não excede a tripulação máxima ($tentativa[k] < NS$). Com isso, armazena-se o número de

entregadores corrente ($server_s[k] = server[k]$) e adiciona-se um entregador para cada rota individualmente.

Passo 2.3: Cada designação de entregadores gera um conjunto de rotas resultantes da união de rotas (Rt_k) em St_k .

Na designação de 3 entregadores à rota 2 não houve união de rotas, somente a diminuição do tempo de rota como apresentado na Figura 4.12.

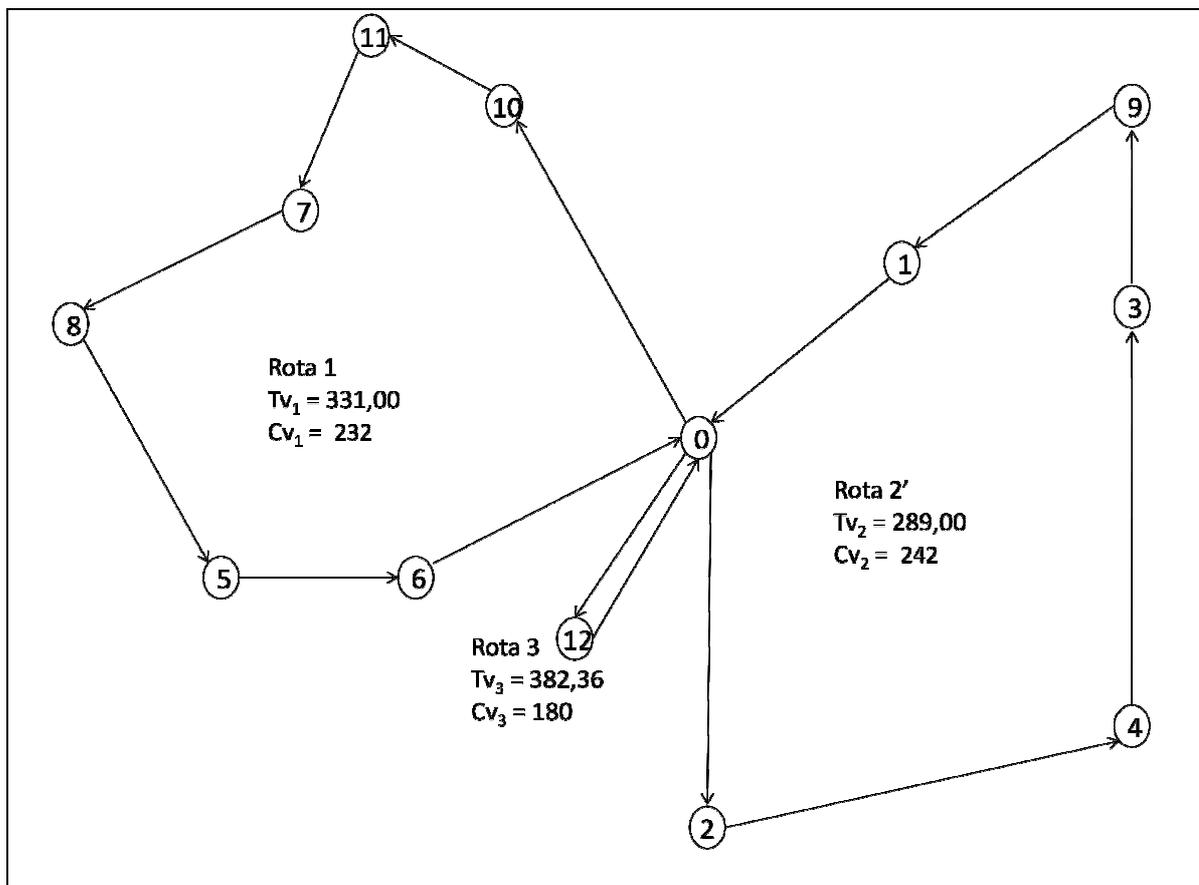


Figura 4.12: Designação de entregadores à rota 2, com $server[2] = 3$.

A rota 2 volta à sua condição inicial (Figura 4.11). Em seguida, designam-se de 2 entregadores à rota 3. Não houve união de rotas, somente a diminuição do tempo de rota como apresentado na Figura 4.13.

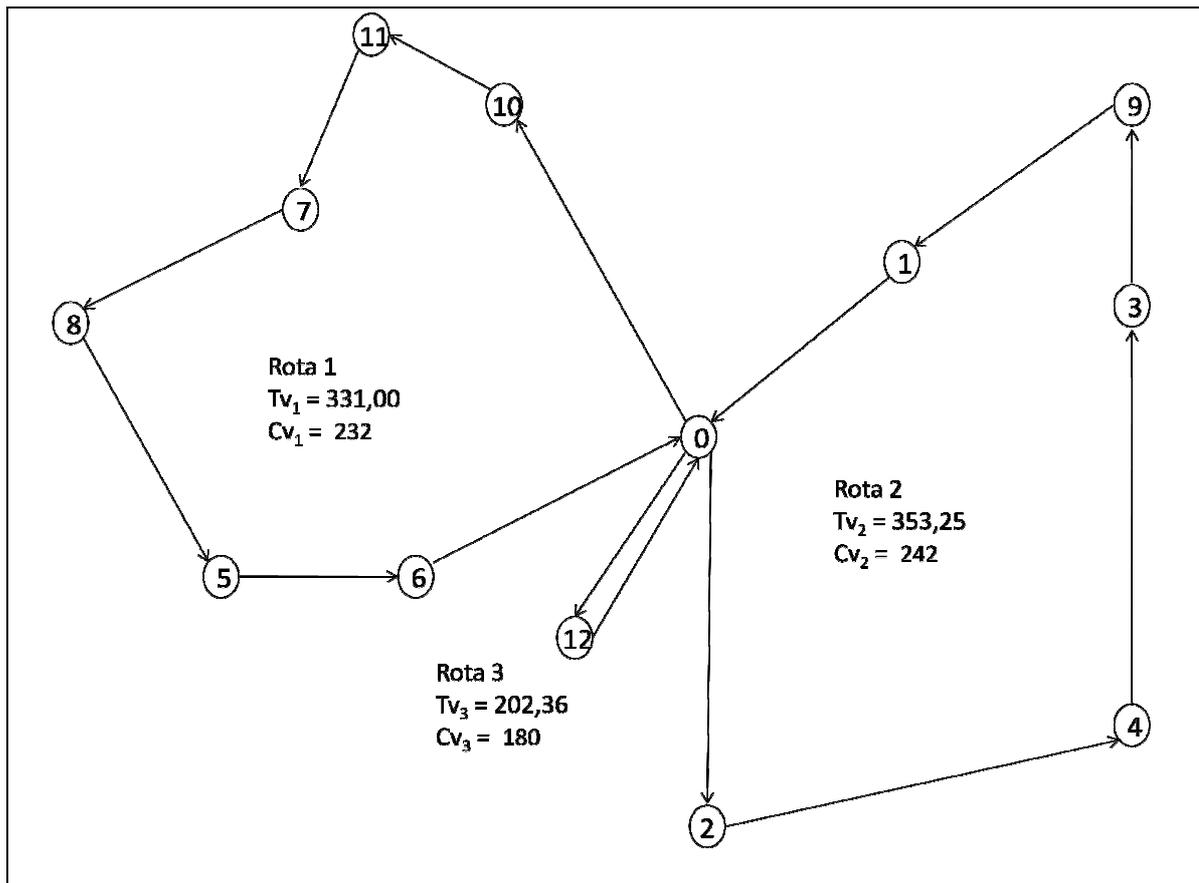


Figura 4.13: Designação de entregadores à rota 3, com $server[3] = 2$.

Passo 2.4: Não houve união de rotas nesta iteração, somente a diminuição do tempo de rota, portanto não há a seleção de nenhuma rota Rt_k . A solução S permanece inalterada, ou seja, o conjunto de rotas é o mesmo apresentado na Figura 4.11.

Neste momento, os valores dos elementos dos vetores $server[k]$, $tentativa[k]$ e o número de clientes servidos em cada rota k são os seguintes:

k	$server[k]$	$tentativa[k]$	Nº de clientes
1	2	3	6
2	2	3	5
3	1	2	1

As rotas 1 e 2 já foram testadas com o número máximo de entregadores permitido, portanto não haverá mais acréscimo de entregadores nestas rotas.

Passos 2.1 a 2.2: O número de rotas ($r = 3$) é ainda superior ao tamanho da frota ($r > NV$), o número de entregadores em cada rota não excede a tripulação máxima ($server[k] < NS$), e o número de entregadores testados em cada rota não excede a tripulação máxima ($tentativa[k] < NS$). Com isso, armazena-se o número de entregadores corrente ($server_s[k] = server[k]$) e adiciona-se um entregador para cada rota individualmente.

Passo 2.3: Cada designação de entregadores gera um conjunto de rotas resultantes da união de rotas (Rt_k) em St_k .

Na designação de 3 entregadores à rota 3 não houve união de rotas, somente a diminuição do tempo de rota como apresentado na Figura 4.14.

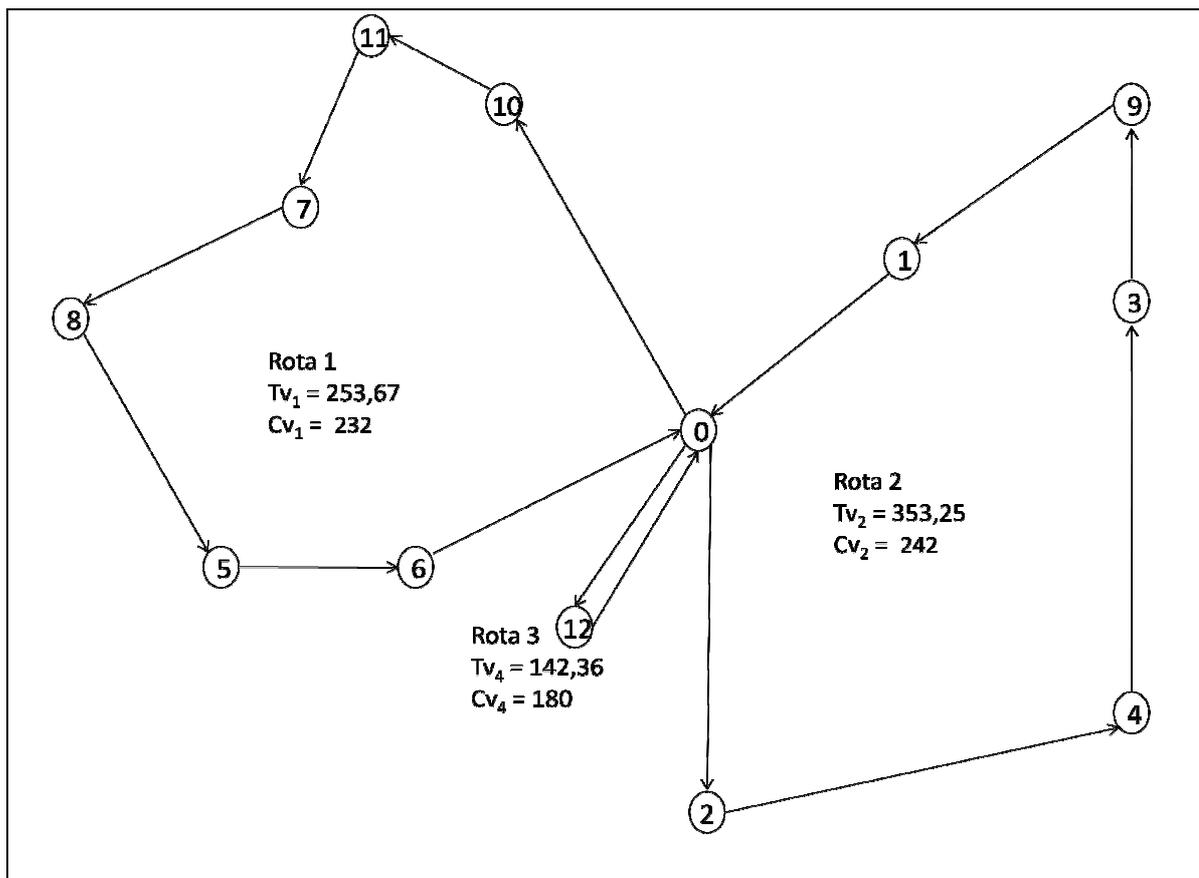


Figura 4.14: Designação de entregadores à rota 3, com $server[3] = 3$.

Passo 2.4: Não houve união de rotas nesta iteração, somente a diminuição do tempo de rota, portanto não há a seleção de nenhuma rota Rt_k . A solução S permanece inalterada, ou seja, o conjunto de rotas é o mesmo apresentado na Figura 4.11.

Neste momento, os valores dos elementos dos vetores $server[k]$, $tentativa[k]$ e o número de clientes servidos em cada rota k são os seguintes:

k	server[k]	tentativa[k]	Nº de clientes
1	2	3	6
2	2	3	5
3	1	3	1

Todas as possibilidades de designação de entregadores para cada rota foram testadas ($tentativa[k] = NS$). Assim, sem mais tentativas a serem efetuadas, o algoritmo deixa o laço dos passos 2.1 a 2.3.

Passo 3: Como o número de rotas em S ($r = 3$) é maior que o tamanho da frota ($r > NV$), as NV rotas ($NV = 2$) com o maior número de clientes são selecionadas para compor a solução final S^* , ilustrada na Figura 4.15. Os clientes das ($r - NV$) rotas restantes (1) não são atendidos (não foram aplicados os passos adicionais). O número de entregadores em S^* é aquele obtido na última iteração em que houve junção de rotas, ou seja, 2 entregadores para cada uma das rotas ($server[k] = 2$ para $k = 1..2$).

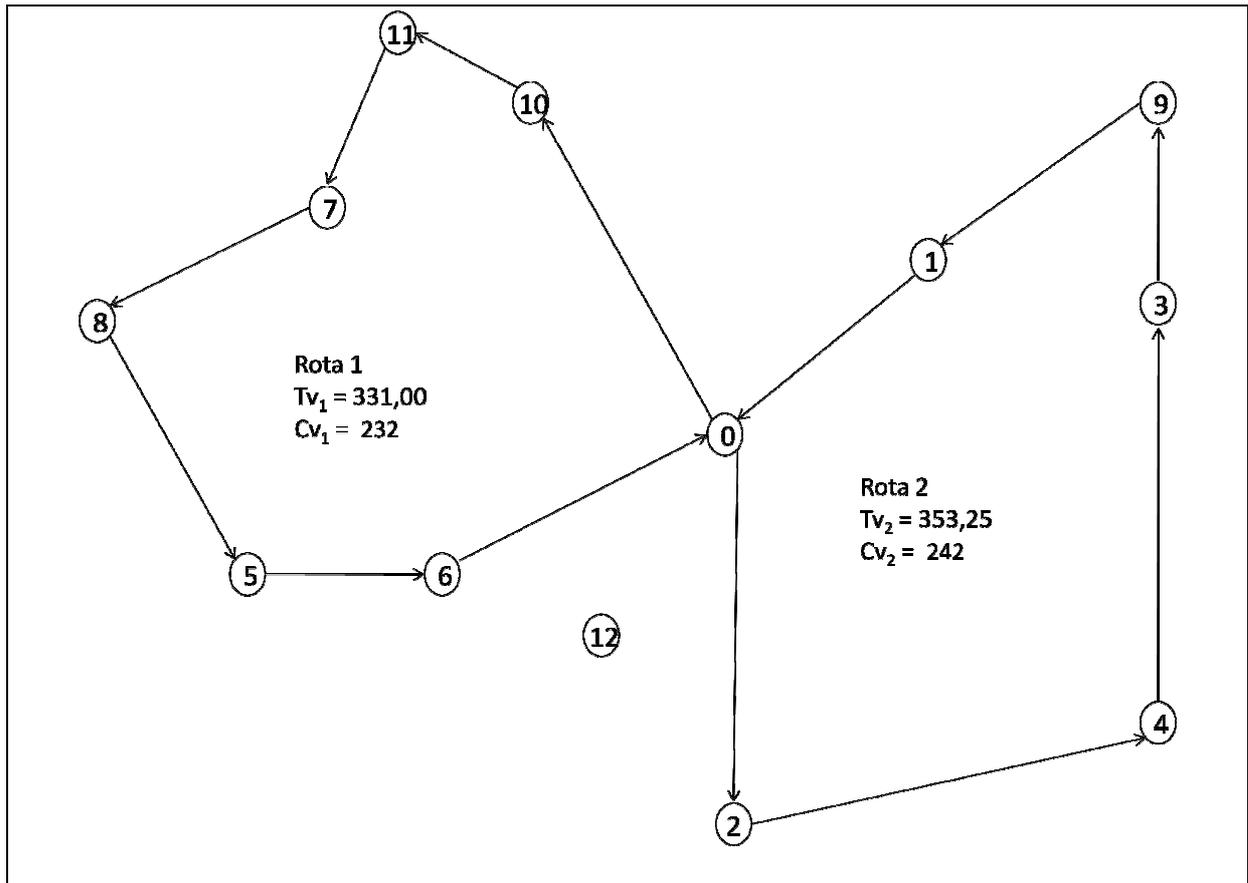


Figura 4.15: Solução final S^* do algoritmo CW_{ext} com $server[k] = 2$ para $k = 1..2$.

A solução do algoritmo CW_{ext} pode ser confrontada com aquela obtida com o algoritmo CW , por sua vez, ilustrada na Figura 4.16.

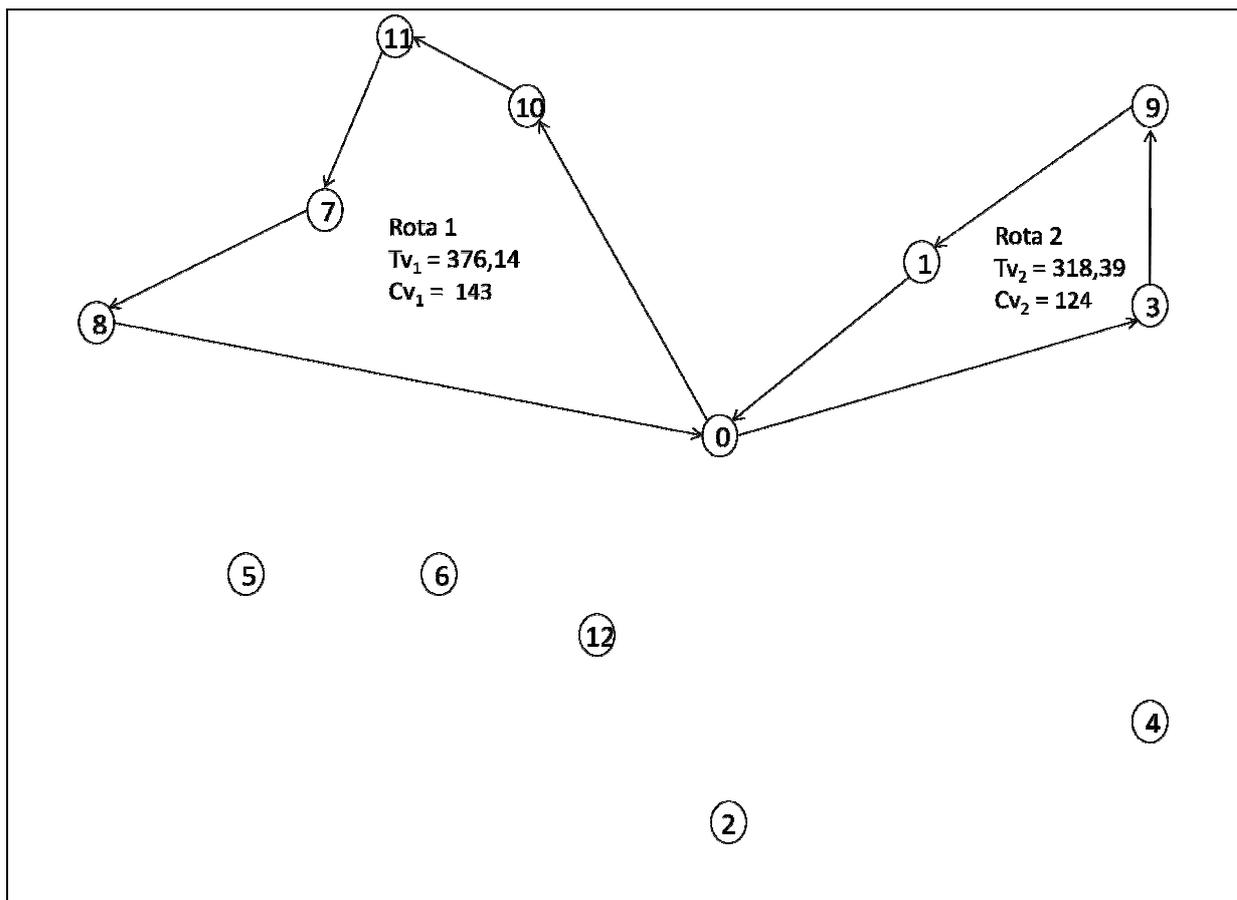


Figura 4.16: Solução final S^* do algoritmo CW.

Os resultados obtidos pelos algoritmos CW e CW_{ext} são sumarizados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Resultados com o exemplo ilustrativo.

ALGORITMO	Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS (r)	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS	Nº DE CLIENTES NÃO ATENDIDOS	Nº DE ENTREGADORES EXTRAS UTILIZADOS	DISTÂNCIA MÉDIA POR ROTA (km/r)	TEMPO MÉDIO DE ROTA (min/r)
CW	2	7	5	0	57,58	319,18
CW_{ext}	2	11	1	2	105,13	342,13

Observa-se que o algoritmo CW obteve uma porcentagem de atendimentos realizados de 58,3%, enquanto sua extensão (CW_{ext}) apresentou uma solução com 91,7% dos clientes atendidos. Ressalta-se que os valores médios de distância e tempo de

rota tiveram um aumento de aproximadamente 82 e 7%, respectivamente. Incrementos nestes valores são esperados dado o aumento no número de atendimentos. Mostra-se, assim, que mesmo a designação de poucos entregadores extras às rotas de um pequeno exemplo é capaz de trazer impactos substanciais na qualidade do serviço.

O capítulo a seguir apresenta os resultados obtidos com os algoritmos com exemplos de maior porte, gerados a partir instâncias teste da literatura. Conforme será visto, os impactos positivos da utilização de entregadores extras não se restringem ao aumento do nível de serviço e à diminuição da violação de restrições de tempo de rota.

Neste trabalho não foram contempladas as restrições de frota heterogênea e janelas de tempo. Existe a possibilidade da extensão desta pesquisa para estas restrições. Em relação à utilização de frota heterogênea, o estudo poderia ser feito pelo mesmo método proposto neste trabalho. Já para contemplar a restrição de janelas de tempo seria melhor utilizar outros métodos existentes e que são mais robustos para esta restrição. Para isso, poderia ser proposto um método utilizando heurísticas de inserção para janelas de tempo, como a heurística proposta por Solomon (1987).

CAPÍTULO 5 – EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

5.1 Geração das instâncias

A fim de verificar o desempenho das heurísticas CW e CW_{ext} e suas variações com o passo adicional, conjuntos de instâncias com 50, 75, 100, 120, 150 e 199 nós foram gerados a partir de exemplos clássicos propostos em Solomon (1987) e Christofides et al. (1979). Da primeira fonte, apenas uma das instâncias de cada conjunto (C1, C2, R1, R2, RC1 e RC2) foi utilizada na geração, uma vez que as janelas de tempo (não abordadas neste trabalho) são o único fator que as diferencia em um mesmo conjunto. Da segunda fonte, foram selecionados os exemplos $vrpnc1$, $vrpnc2$, $vrpnc3$, $vrpnc4$, $vrpnc5$, $vrpnc11$ e $vrpnc12$. Os demais exemplos não foram utilizados, pois o que os diferencia um do outro são os tempos máximos de rota; neste trabalho, tempos máximos de rota foram especificados na geração das instâncias.

Seis cenários foram considerados para geração das instâncias a partir dos exemplos de Solomon (totalizando seis instâncias). No primeiro cenário são utilizados os mesmos tempos de atendimento em cada nó apresentados nas instâncias originais. No segundo cenário, a demanda original de cada nó é duplicada. No terceiro cenário, os tempos de atendimento para cada nó são calculados pela função t_s (4.1), descrita na seção 4.1. No quarto cenário, o tamanho da frota é reduzido a um terço de seu valor original. No quinto cenário, a capacidade da frota é reduzida em 15%. E finalmente, o sexto cenário combina as alterações prescritas dos quatro cenários anteriores. O Quadro 5.1 sumariza as características do ambiente de teste.

Cenário	Tempo de atendimento	Demanda	Tamanho de frota	Capacidade dos veículos
1	◦	◦	◦	◦
2	◦	$\times 2$	◦	◦
3	(4.1)	◦	◦	◦
4	◦	◦	$\times \frac{1}{3}$	◦
5	◦	◦	◦	$\times 0,85$
6	(4.1)	$\times 2$	$\times \frac{1}{3}$	$\times 0,85$

Quadro 5.1: Características das instâncias nos cenários de teste com exemplos de Solomon (1987).

Para as instâncias geradas a partir dos exemplos de Christofides, cinco cenários (totalizando 35 instâncias) são também considerados. Entretanto, estes cenários não são os mesmos do quadro anterior uma vez que os tempos de atendimento originais dos exemplos são iguais a zero. Assim, o cenário 1 do quadro anterior não é tratado, e os demais cenários produzem instâncias com tempo de atendimento calculado pela função t_s (4.1). O Quadro 5.2 sumariza as características do ambiente de teste.

Cenário	Tempo de atendimento	Demanda	Tamanho de frota	Capacidade dos veículos
2'	(4.1)	$\times 2$	◦	◦
3'	(4.1)	◦	◦	◦
4'	(4.1)	◦	$\times \frac{1}{3}$	◦
5'	(4.1)	◦	◦	$\times 0,85$
6'	(4.1)	$\times 2$	$\times \frac{1}{3}$	$\times 0,85$

Quadro 5.2: Características das instâncias nos cenários teste com exemplos de Christofides et al (1979).

A seção 5.2 apresenta os resultados computacionais obtidos.

5.2 Resultados

Os algoritmos CW e CW_{ext} e suas variações com o passo adicional foram implementados em Borland Delphi 7 e os experimentos realizados em um computador Intel Core2 2,4 GHz, e 2,00 GB de RAM.

Para a resolução do problema abordado neste trabalho, definiu-se um tamanho de frota original de 18 veículos. Este valor foi estabelecido obtendo-se o limitante inferior trivial de cada instância (demanda total dividida pela capacidade de um veículo), e adotando-se o maior destes valores como tamanho de frota para todas as instâncias. A velocidade de deslocamento para todos os veículos é constante e igual a 60 km/h.

Para a resolução das instâncias dos algoritmos foram gerados tempos máximos de rota (T_v) aleatórios nos valores de 150, 230 e 480 minutos. Para as variações com o passo adicional dos algoritmos CW e CW_{ext} a violação permitida em relação aos tempos máximos de rota foi de 25%, ou seja, o tempo máximo de rota poderia ser violado em no máximo 25%.

O desempenho dos quatro algoritmos foi medido segundo os seguintes critérios ordenados lexicograficamente: (i) número de paradas atendidas, (ii) demanda total atendida, (iii) número de veículos utilizados, (iv) número de entregadores extras utilizados, (v) distância total percorrida, e (vi) tempo de rota. As análises consistiram na comparação de desempenho entre os algoritmos CW e CW_{ext} , e entre suas variações com passo adicional em cada cenário.

Para cada critério acima citado, foram calculados os desvios percentuais médios, ou seja, calculando-se a diferença entre as médias dos resultados obtidos com os algoritmos CW e CW_{ext} , dividindo-se esse valor pela média dos resultados com o algoritmo CW , e multiplicando-se por 100%. Para cada algoritmo, as porcentagens

médias de clientes atendidos e veículos utilizados em relação ao total disponível também foram computadas. As mesmas medidas foram também calculadas para as variações dos algoritmos CW e CW_{ext} com o passo adicional. Detalhes sobre cada solução individual são apresentados no Apêndice I.

5.2.1 Instâncias baseadas em Solomon (1987)

Nas seções que se seguem, os critérios (i–vi) foram organizados por cenário para realização de análises. As Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam os resultados de cada cenário estudado, comparando-se CW e CW_{ext} para as instâncias baseadas em Solomon (1987) com tempos máximos de rota iguais a 150, 230 e 480 minutos. A segunda e a terceira coluna de cada tabela (N^o de clientes atendidos e N^o de veículos utilizados, respectivamente) foram estruturadas de maneira diferenciada para contemplar a porcentagem de clientes atendidos/veículos utilizados do total. Estas colunas foram divididas em três colunas secundárias e apresentam a porcentagem de clientes atendidos/veículos utilizados do total em CW, a porcentagem de clientes atendidos/veículos utilizados do total em CW_{ext} e o desvio percentual (DP) para tais critérios. As demais colunas apresentam somente os desvios percentuais (DP) para os critérios (i–vi).

Da mesma forma, as Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam os resultados de todos os cenários comparando-se os algoritmos CW e CW_{ext} com passo adicional para as instâncias baseadas em Solomon (1987), também considerando os tempos máximos de rota iguais a 150, 230 e 480 minutos.

5.2.1.1 CW_{ext} vs CW

Os resultados da Tabela 5.1 mostram que o algoritmo CW_{ext} apresenta melhores soluções em relação ao algoritmo CW em todos os cenários, considerando-se a ordem lexicográfica de critérios adotada. No cenário 1 nota-se um aumento de 9,91% na quantidade de clientes (pontos de parada) atendida, resultando no aumento da demanda total atendida (11,10%), e redução do número de veículos utilizados (1,89%), e do tempo máximo de rota (0,79%). Em contrapartida, a obtenção dessas melhorias é acompanhada de um incremento do número de entregadores utilizados de 35,85%, e da distância total de 0,13%.

Tabela 5.1: Desempenho do algoritmo CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Solomon (1987) e tempo máximo de rota igual a 150 min.

CENÁRIOS	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS			Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS			ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA
	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	DP	DP	DP	DP
CENÁRIO 1	70,67	77,67	9,91	98,15	96,30	-1,89	35,85	0,13	-0,79	11,10
CENÁRIO 2	70,17	76,67	9,26	99,07	97,22	-1,87	34,58	-1,09	-1,21	10,42
CENÁRIO 3	54,33	64,50	18,71	100,0	100,0	0,00	35,19	7,11	2,35	32,98
CENÁRIO 4	29,33	35,50	21,02	100,0	100,0	0,00	77,78	-2,20	-2,39	33,80
CENÁRIO 5	70,67	77,67	9,91	98,15	97,22	-0,94	35,85	0,27	-0,41	11,10
CENÁRIO 6	27,17	32,33	19,02	100,0	100,0	0,00	72,22	-5,31	-3,34	29,35

Note na Tabela 5.1 que a duplicação da demanda no cenário 2 provoca, em geral, ganhos apenas ligeiramente menores de CW_{ext} em relação ao cenário anterior. Cabe, no entanto, ressaltar que estas melhorias foram obtidas com redução da distância total de 1,09%. No cenário 3, por sua vez, observa-se que o uso do tempo de serviço proporcional à demanda, resulta em um aumento de 18,71% do número de clientes atendidos e de 32,98% da demanda total atendida. Neste caso, não houve alteração na

quantidade de veículos utilizada, e a obtenção dessas melhorias é acompanhada de um incremento da distância total e do tempo de rota de 7,11% e 2,35% respectivamente.

No cenário 4, caracterizado pela diminuição da frota em $\frac{1}{3}$, o incremento na quantidade de clientes atendidos alcança 21,02%, levando a um aumento de 33,80% da demanda total atendida. Aqui também não se verifica alteração na quantidade de veículos utilizados, mas o aumento no número de entregadores requeridos para compensar a redução da frota (77,78%) é considerável. Ainda assim, observa-se redução na distância total (2,20%) e tempo de rota (2,39%). No cenário 5 (redução da capacidade dos veículos em 15%), os resultados são similares aos dos cenários 1 e 2, o que indica que a redução da capacidade dos veículos em 15% tem um impacto similar ao dos parâmetros originais e à duplicação da demanda. No cenário 6 (combinação das alterações dos quatro cenários anteriores), os ganhos de CW_{ext} são apenas um pouco menores que os do cenário 4.

Tabela 5.2: Desempenho do algoritmo CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Solomon (1987) e tempo máximo de rota igual a 230 min.

CENÁRIOS	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS			Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS			ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA
	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	DP	DP	DP	DP
CENÁRIO 1	78,67	89,50	13,77	67,59	67,59	0,00	75,34	32,19	0,40	17,93
CENÁRIO 2	78,67	89,17	13,35	80,56	80,56	0,00	64,37	28,27	0,29	18,17
CENÁRIO 3	81,67	90,67	11,02	100,0	100,0	0,00	16,67	6,44	2,08	14,92
CENÁRIO 4	50,33	56,50	12,25	100,0	100,0	0,00	66,67	13,76	0,22	14,92
CENÁRIO 5	78,67	89,50	13,77	69,44	69,44	0,00	73,33	31,28	0,39	17,93
CENÁRIO 6	41,00	46,67	13,82	100,0	100,0	0,00	63,89	15,67	0,42	16,12

Quando o tempo máximo de rota é aumentado para 230 minutos, nota-se um comportamento geral similar aos resultados anteriores descritos. Cabe ressaltar, entretanto, que o aumento do tempo máximo de rota possibilitou o atendimento de

maior número de clientes quando comparados aos cenários com tempo máximo de rota igual a 150 minutos (média de 68,2% contra média de 53,7% para o CW, e média de 77,0% contra média de 60,7% para o CW_{ext}). Para compensar o aumento no nível de serviço não se verifica alteração na quantidade de veículos utilizados, porém, no geral, observa-se o aumento relevante do número de entregadores necessário para o atendimento em todos os cenários em questão (entre 16,7% e 75,3%). A melhoria no nível de serviço também resultou no incremento da distância total percorrida e no tempo de rota em todos os cenários.

Tabela 5.3: Desempenho do algoritmo CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Solomon (1987) e tempo máximo de rota igual a 480 min.

CENÁRIOS	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS			Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS			ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA
	CW (%)	CW _{ext} (%)	DP	CW (%)	CW _{ext} (%)	DP	DP	DP	DP	DP
CENÁRIO 1	90,67	100,0	10,29	56,48	46,30	-18,03	26,23	0,73	-18,44	11,38
CENÁRIO 2	90,67	97,50	7,54	71,30	66,67	-6,49	15,58	2,77	-8,02	8,14
CENÁRIO 3	100,00	100,0	0,00	53,70	50,93	-5,17	0,00	-0,65	-2,85	0,00
CENÁRIO 4	66,67	79,83	19,75	88,89	88,89	0,00	65,63	9,46	1,87	22,56
CENÁRIO 5	90,67	100,0	10,29	59,26	50,00	-15,63	25,00	2,10	-16,20	11,38
CENÁRIO 6	54,50	62,33	14,37	91,67	91,67	0,00	39,39	5,87	0,28	17,46

O aumento do tempo máximo de rota para 480 minutos continua indicando as vantagens da utilização do algoritmo CW_{ext} em relação ao algoritmo CW em todos os cenários, com um comportamento geral similar aos resultados anteriores. O aumento do tempo máximo de rota mais uma vez provocou o aumento do nível de serviço (médias de 82,2% e 89,9% para CW e CW_{ext}, respectivamente), comparando-se ao conjunto anterior de instâncias. Nos cenários 1 e 5 nota-se uma redução maior do número de veículos (18% e 15,6%, respectivamente) que no conjunto anterior, e que apesar disso, é acompanhada de diminuição do tempo de rota.

No cenário 3, é importante ressaltar que o tempo máximo de rota igual a 480 minutos resultou no atendimento de todos os clientes, portanto não se verifica alteração na quantidade de clientes atendidos. Algumas melhorias providas por CW_{ext} são verificadas neste cenário, especificamente, em relação ao número de veículos utilizados (5,17%), distância percorrida (0,65%) e tempo de rota (2,85). Este fato é, naturalmente, devido à designação de entregadores extras em algumas rotas deste cenário. Cabe ressaltar que não houve alteração no número total de entregadores, pois a quantidade de entregadores extras designados é igual à quantidade de veículos que deixou de ser utilizada, ou seja, a quantidade de entregadores designados é igual à quantidade de motoristas que passaram a ser desnecessários com a redução do número de veículos.

A análise dos resultados dos algoritmos CW e CW_{ext} para estes três conjuntos de instâncias permite concluir, de maneira geral, que o aumento do tempo máximo de rota favorece a melhoria do nível de serviço, uma vez que o atendimento das demandas está diretamente relacionado ao tempo de rota disponível para o atendimento. No cenário 1 a designação de entregadores extras possibilitou em alguns casos a redução da frota utilizada. No cenário 2, mesmo com o aumento da demanda, a extensão da heurística de Clarke e Wright permitiu a obtenção de níveis de atendimento semelhantes aos apresentados pelo cenário 1.

Quando os tempos de serviço são proporcionais às demandas dos clientes (cenário 3), o uso de entregadores extras nas rotas geradas é uma decisão particularmente vantajosa no que diz respeito ao nível de serviço. É possível notar neste cenário que os ganhos do algoritmo CW_{ext} em relação à CW são maiores quanto menor o tempo máximo de rota (análise em relação aos desvios percentuais e não em relação à porcentagem de clientes atendidos). Considerando reduções do tamanho da frota representadas pelo cenário 4, nota-se que a designação de entregadores extras

possibilitou um aumento considerável no número de clientes atendidos em relação a soluções com um único entregador. No cenário 5, observa-se que, para a redução da capacidade dos veículos utilizados, a extensão do algoritmo CW também resultou na melhoria do nível de serviço e, em alguns casos, na redução da frota designada para o atendimento.

O cenário 6 pode ser considerado o cenário mais restritivo em relação às capacidades oferecidas para o atendimento; o uso de entregadores extras mostrou-se bastante vantajoso, tanto em relação ao aumento de nível de serviço quanto na redução de custos operacionais. Portanto, avaliando-se todos os cenários, observa-se que a redução do tamanho da frota é o fator que mais ressalta as vantagens do uso de entregadores extras.

5.2.1.2 CW_{ext} vs CW (com passo adicional)

Ao se comparar a utilização do passo adicional em ambos os algoritmos, verifica-se que os ganhos não foram muito significativos quando comparados aos algoritmos CW e CW_{ext}. Conforme observado nas Tabelas 5.4–5.6, melhorias provocadas pelo passo adicional em relação ao número de clientes atendidos variam em média entre (0,7% e 2,1%), com violações médias do tempo máximo de rota de 1,5% para CW. Para CW_{ext}, estas melhorias variam entre 0,6% e 2,1%, com violações médias do tempo máximo de rota de 1,0%. Essas poucas melhorias são justificadas principalmente pelas restrições de capacidades dos veículos.

Tabela 5.4: Desempenho do algoritmo com passo adicional CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Solomon (1987) e tempo máximo de rota igual a 150 min.

CENÁRIOS	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS			Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS			ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA
	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	DP	DP	DP	DP
CENÁRIO 1	70,67	77,67	9,91	98,15	96,30	-1,89	35,85	0,13	-0,79	11,10
CENÁRIO 2	70,17	76,67	9,26	99,07	97,22	-1,87	34,58	-1,09	-1,21	10,42
CENÁRIO 3	55,33	65,67	18,67	100,0	100,0	0,00	35,19	7,16	2,50	32,96
CENÁRIO 4	29,33	35,50	21,02	100,0	100,0	0,00	77,78	-2,20	-2,39	33,80
CENÁRIO 5	70,67	77,67	9,91	98,15	97,22	-0,94	35,85	0,27	-0,41	11,10
CENÁRIO 6	27,50	32,67	18,79	100,0	100,0	0,00	72,22	-5,28	-3,32	29,32

Tabela 5.5: Resultados agregados para os algoritmos CW e CW_{ext} com passo adicional para tempo máximo de rota igual a 230 min.

CENÁRIOS	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS			Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS			ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA
	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	DP	DP	DP	DP
CENÁRIO 1	78,67	89,50	13,77	67,59	67,59	0,00	75,34	32,19	0,40	17,93
CENÁRIO 2	78,67	89,17	13,35	80,56	80,56	0,00	64,37	28,27	0,29	18,17
CENÁRIO 3	82,67	90,67	9,68	100,0	100,0	0,00	16,67	4,10	0,75	14,01
CENÁRIO 4	50,67	56,83	12,17	100,0	100,0	0,00	66,67	13,65	0,22	14,89
CENÁRIO 5	78,67	89,50	13,77	69,44	69,44	0,00	73,33	31,28	0,39	17,93
CENÁRIO 6	41,83	47,50	13,55	100,0	100,0	0,00	63,89	14,51	0,40	16,08

Tabela 5.6: Resultados agregados para os algoritmos CW e CW_{ext} com passo adicional para tempo máximo de rota igual a 480 min.

CENÁRIOS	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS			Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS			ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA
	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	DP	DP	DP	DP
CENÁRIO 1	91,83	100,0	8,89	56,48	46,30	-18,03	26,23	-3,28	-21,45	10,52
CENÁRIO 2	91,83	97,50	6,17	71,30	66,67	-6,49	15,58	-0,80	-11,28	7,30
CENÁRIO 3	100,0	100,0	0,00	53,70	50,93	-5,17	0,00	-0,65	-2,85	0,00
CENÁRIO 4	67,83	81,33	19,90	88,89	88,89	0,00	65,63	13,26	4,01	22,68
CENÁRIO 5	91,83	100,0	8,89	59,26	50,00	-15,63	25,00	-1,82	-19,26	10,52
CENÁRIO 6	55,67	63,67	14,37	91,67	91,67	0,00	39,39	5,25	1,03	17,55

5.2.2 Instâncias baseadas em Christofides et al. (1979)

5.2.2.1 CW_{ext} vs CW

As Tabelas 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam os resultados de comparações entre CW e CW_{ext} para todos os 5 cenários propostos para as instâncias baseadas em Christofides et al. (1979), e considerando tempos máximos de rota iguais a 150, 230 e 480 minutos. Sua organização foi realizada de forma similar ao apresentado para as instâncias baseadas em Solomon (1987). Os desvios percentuais médios para cada critério (i-vi) são também apresentados. Finalmente, as Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam os resultados associados com passo adicional em ambos os algoritmos.

Tabela 5.7: Desempenho do algoritmo CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Christofides et al. (1979) e tempo máximo de rota igual a 150 min.

CENÁRIOS	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS			Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS			ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA
	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	DP	DP	DP	DP
CENÁRIO 2	33,96	52,70	59,00	100,0	100,0	0,00	105,56	25,63	7,54	105,84
CENÁRIO 3	49,81	63,27	29,43	100,0	100,0	0,00	48,15	7,30	1,78	49,58
CENÁRIO 4	21,13	30,06	44,97	100,0	100,0	0,00	108,33	14,09	1,80	101,55
CENÁRIO 5	49,81	63,52	30,00	100,0	100,0	0,00	39,81	7,67	2,10	50,65
CENÁRIO 6	13,58	26,04	94,79	100,0	100,0	0,00	169,44	12,74	1,67	161,67

Nota-se na Tabela 5.7 que a utilização do algoritmo CW_{ext} apresenta melhores soluções em relação ao algoritmo CW em todos os cenários, considerando-se a ordem lexicográfica de critérios utilizada. Em todos os cenários o número de veículos não foi alterado, a frota total disponibilizada é utilizada nas soluções de ambos os algoritmos. Nota-se também que estas instâncias são consideravelmente mais difíceis de resultar em bons níveis de serviço, em vista da reduzida porcentagem de clientes atendidos. CW_{ext}

provê um aumento relativo importante neste quesito e na demanda total atendida. A melhoria no nível de serviço requer, por outro lado, um aumento considerável do número de entregadores extras designados para as rotas, na distância percorrida e no tempo de rota.

Com o aumento do tempo máximo de rota para 230 minutos (Tabela 5.8), nota-se um comportamento geral similar aos resultados descritos para a Tabela 5.7. Cabe ressaltar que o aumento do tempo máximo de rota possibilitou o atendimento de maior número de clientes comparando-se aos resultados com o tempo máximo de rota anteriormente descrito. Para prover o aumento no nível de serviço, é requerido um grande aumento do número de entregadores (entre 18,5% e 108,3%). Nota-se redução do número de veículos utilizados somente no cenário 3 (0,93%). A melhoria no nível de serviço também resultou no incremento da distância total percorrida (com exceção do cenário 3) e no tempo de rota em todos os cenários.

Tabela 5.8: Desempenho do algoritmo CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Christofides et al. (1979) e tempo máximo de rota igual a 230 min.

CENÁRIOS	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS			Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS			ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA
	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	DP	DP	DP	DP
CENÁRIO 2	48,55	67,42	42,94	100,0	100,0	0,00	71,30	20,50	3,85	65,78
CENÁRIO 3	73,58	81,38	11,59	100,0	99,07	-0,93	19,44	3,22	-0,36	15,53
CENÁRIO 4	21,13	30,06	44,97	100,0	100,0	0,00	108,33	14,09	1,80	101,55
CENÁRIO 5	73,58	80,75	10,65	100,0	100,0	0,00	18,52	4,01	0,43	14,04
CENÁRIO 6	19,87	29,31	50,00	100,0	100,0	0,00	97,22	24,75	2,61	83,72

De forma geral, observa-se que com o aumento do tempo máximo de rota para 480 minutos (Tabela 5.10), as soluções apresentam um padrão diferente do apresentado anteriormente. Nos cenários 2 e 6, nota-se que não há alterações em nenhum dos critérios ao se comparar os dois algoritmos.. Nos cenários 3 e 5, verifica-se que não há

alteração na quantidade de clientes atendidos, porém pequenas melhorias são observadas em relação ao número de veículos utilizados (1,5% e 1,4% respectivamente), à distância percorrida (0,1% e 0,1%) e ao tempo de rota (0,7% e 0,5%). Observa-se também que não houve alteração no número de entregadores com a aplicação de CW_{ext} , pois a quantidade de entregadores extras designados é igual à quantidade de veículos que deixou de ser utilizada.

Tabela 5.9: Desempenho do algoritmo CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Christofides et al. (1979) e tempo máximo de rota igual a 480 min.

CENÁRIOS	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS			Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS			ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA
	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	DP	DP	DP	DP
CENÁRIO 2	85,16	85,16	0,00	97,22	97,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CENÁRIO 3	99,87	99,87	0,00	62,96	62,04	-1,47	0,00	-0,14	-0,68	0,00
CENÁRIO 4	62,64	62,89	0,45	100,0	100,00	0,00	2,78	0,23	-0,76	0,48
CENÁRIO 5	98,62	98,62	0,00	68,52	67,59	-1,35	0,00	-0,10	-0,54	0,00
CENÁRIO 6	33,46	33,46	0,00	100,0	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Verificando os resultados dos algoritmos CW e CW_{ext} para os dois primeiros conjuntos de instâncias ($T_v = 150$ minutos e $T_v = 230$ minutos) conclui-se que o aumento do tempo máximo de rota promove o aumento do nível de serviço, uma vez que o atendimento das demandas está diretamente relacionado ao tempo de rota disponível para o atendimento. No cenário 2, com o aumento da demanda, a designação de entregadores extras possibilitou o aumento do número de clientes atendidos. No cenário 3 a designação de entregadores extras possibilitou o aumento do número de clientes atendidos e, em alguns casos, uma pequena redução da frota utilizada.

Considerando reduções do tamanho da frota representadas no cenário 4, nota-se que a designação de entregadores extras também possibilitou um incremento no número de clientes atendidos. No cenário 5, observa-se que, para a redução da capacidade dos

veículos utilizados, a extensão do algoritmo CW também resultou na melhoria do nível de serviço e em alguns casos na redução da frota designada para o atendimento. Para o cenário 6, mais restritivo, a utilização de entregadores extras apresentou ganhos em relação ao nível de serviço. Assim, interpretando-se todos os cenários, nota-se que a redução do tamanho da frota é o fator que mais ressalta as vantagens do uso de entregadores extras em níveis de serviço.

Para as instâncias do terceiro conjunto ($T_v = 480$ minutos), os ganhos de CW_{ext} podem ser considerados apenas marginais.

5.2.2.2 CW_{ext} vs CW (com passo adicional)

De forma similar à seção 5.2.1.2, as Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam os resultados de todos os cenários comparando-se os algoritmos CW e CW_{ext} com passo adicional e tempos máximos de rota iguais a 150, 230 e 480 minutos.

Tabela 5.10: Desempenho do algoritmo com passo adicional CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Christofides et al. (1979) e tempo máximo de rota igual a 150 min.

CENÁRIOS	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS			Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS			ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA
	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	DP	DP	DP	DP
CENÁRIO 2	34,59	52,96	57,20	100,0	100,0	0,00	105,56	23,64	6,80	105,06
CENÁRIO 3	50,57	63,90	29,01	100,0	100,0	0,00	48,15	7,23	1,91	49,56
CENÁRIO 4	21,51	30,57	44,08	100,0	100,0	0,00	108,33	12,04	1,53	101,93
CENÁRIO 5	50,57	64,15	29,58	100,0	100,0	0,00	39,81	7,59	2,22	50,63
CENÁRIO 6	13,84	26,16	90,82	100,0	100,0	0,00	169,44	9,93	0,41	160,65

Tabela 5.11: Desempenho do algoritmo com passo adicional CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Christofides et al. (1979) e tempo máximo de rota igual a 230 min.

CENÁRIOS	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS			Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS			ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA
	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	DP	DP	DP	DP
CENÁRIO 2	49,94	68,18	40,17	100,0	100,0	0,00	71,30	19,40	3,07	64,06
CENÁRIO 3	74,72	81,76	10,29	100,0	99,07	-0,93	19,44	1,37	-1,50	14,60
CENÁRIO 4	21,51	30,57	44,08	100,0	100,0	0,00	108,33	12,04	1,53	101,93
CENÁRIO 5	74,72	81,13	9,38	100,0	100,0	0,00	18,52	2,14	-0,71	13,12
CENÁRIO 6	20,75	29,94	47,22	100,0	100,0	0,00	97,22	21,31	2,53	83,88

Tabela 5.12: Desempenho do algoritmo com passo adicional CW_{ext} relativo à CW com instâncias baseadas em Christofides et al. (1979) e tempo máximo de rota igual a 480 min.

CENÁRIOS	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS			Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS			ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA
	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	CW (%)	CW_{ext} (%)	DP	DP	DP	DP	DP
CENÁRIO 2	86,79	86,79	0,00	97,22	97,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CENÁRIO 3	99,87	99,87	0,00	62,96	62,04	-1,47	0,00	-0,14	-0,68	0,00
CENÁRIO 4	64,91	65,03	0,21	100,0	100,0	0,00	2,78	-1,06	-1,18	0,30
CENÁRIO 5	98,87	98,87	0,00	68,52	67,59	-1,35	0,00	-0,10	-0,54	0,00
CENÁRIO 6	35,22	35,22	0,00	100,0	100,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Assim como verificado na seção anterior, a utilização do passo adicional em ambos os algoritmos não trouxe ganhos significativos. Conforme observado nas Tabelas 5.4-5.6, melhorias em relação ao número de clientes atendidos variam em média entre 0,3% e 5,5%, com violações médias do tempo máximo de rota de 2,0% para CW . Para CW_{ext} , estas melhorias variam entre 0,3% e 5,5%, com violações médias do tempo máximo de rota de 1,6%. Mais uma vez estas poucas melhorias podem ser parcialmente justificadas pelas restrições de capacidade dos veículos.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE PESQUISAS FUTURAS

Este trabalho abordou uma variação do Problema de Roteamento de Veículos que apesar de representar vários sistemas reais de distribuição, ainda não vem recebendo suficiente atenção na literatura acadêmica e em *softwares* comerciais. Nesta variação, admite-se a possibilidade de utilizar múltiplos entregadores em cada rota como forma de reduzir tempos de serviço e viabilizar o atendimento de um maior número de clientes em uma dada jornada de trabalho. Neste sentido, foi proposta uma extensão da heurística construtiva de Clarke e Wright na qual, de forma iterativa, são testados incrementos no número de entregadores em cada rota, e selecionada a opção com maior ganho em número de clientes incorporados. Para a extensão proposta, foi também considerado um procedimento adicional que permite a violação do tempo máximo de rota dentro de limites estabelecidos.

Resultados obtidos a partir das instâncias geradas com base nas instâncias de Solomon (1987) e Christofides (1981) comprovaram que as extensões do algoritmo de Clarke & Wright (CW_{ext} e CW_{ext} com passo adicional) apresentaram ganhos relativos em relação aos algoritmos CW e CW com passo adicional, reduzindo o número de clientes não atendidos na maioria dos cenários testados (desvios percentuais entre 0,21% e 94,79%). Em contrapartida, em alguns dos cenários testados, observou-se o aumento considerável do número de entregadores extras designados às rotas geradas. Verificou-se também, de forma geral, que o aumento do número de clientes atendidos resultou no aumento do tempo de rota e da distância total percorrida. Em alguns cenários notou-se que a utilização da extensão do algoritmo CW garantiu a redução da frota necessária para os atendimentos (desvios percentuais entre 0,93% e 18,03%). As extensões do algoritmo CW também se mostraram particularmente eficientes na

melhoria do nível de serviço nos cenários em que a frota disponível não era suficiente para atender a todos os clientes, e o tempo de atendimento era alto e proporcional à demanda.

Conclui-se assim que a designação de entregadores extras é capaz de prover melhorias significativas em relação ao nível de serviço, de maneira que tal modelo de distribuição poderia beneficiar empresas para as quais o atendimento aos clientes é um objetivo prioritário.

Como perspectivas de pesquisa futura cabe lembrar que a extensão proposta neste trabalho não contempla restrições como janelas de tempo e frota heterogênea. Assim, a metodologia proposta pode e deve ser modificada para incluir estas restrições. É importante ressaltar que a extensão proposta restringe-se a uma heurística construtiva, não utilizando fases de otimização visando possíveis melhorias das rotas. Desta forma, métodos de busca local ou meta-heurísticas são opções que certamente trariam ganhos importantes.

Por fim, seria interessante utilizar dados de empresas que apresentam modelos de distribuição semelhantes aos apresentados neste trabalho para verificar o comportamento da extensão proposta em um cenário real, e onde custos e limitações no número de entregadores disponíveis sejam considerados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTINKEMER, K.; GAVISH, B. **Parallel Savings Based Heuristic for the Delivery Problem.** Operations Research, 39, 456-469, 1991.
- ASSAD, A. A. **Modeling and Implementation Issues in Vehicle Routing.** Vehicle Routing: Methods and Studies. B.L.Golden, A.A.Assad (eds), North Holland, Amsterdam, 7-46, 1988.
- BAKER, B. M.; AVECHEW, M. A. **A Genetic Algorithm for the Vehicle Routing Problem.** Computers & Operations Research, 30 (5), 787-800, 2003.
- BAKER B.M.; CARRETO, C. A. C. **A Visual Interactive Approach to Vehicle Routing.** Computers & Operations Research, 30, 321–337, 2003.
- BALINSKI, M.; QUANDT, R. **On an Integer Program for a Delivery Problem.** Operations Research, 12, 300-304, 1964.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial.** 4ª edição, Bookmann, Porto Alegre, 2001.
- BERGER J.; BARKAOUI, M. **Hybrid Genetic Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem.** Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, 646-656, Chicago, 2003.
- BODIN, L. D.; GOLDEN, B. L.; ASSAD, A. A.; BALL, M. **Routing and Scheduling of Vehicle and Crews, the State of the Art.** Computers and Operational Research, 10, 69-211, 1983.
- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logística Empresarial: O Processo de Integração da Cadeia de Suprimento.** 1ª Edição – 6ª Reimp., Atlas, São Paulo, 2008.
- BRAMEL, J.; SIMCHI-LEVI, D. **A Location Based Heuristic for General Routing Problems.** Operations Research, 43, 649-660, 1995.

- BREEDAM, A. V. **Improvement Heuristics for the Vehicle Routing Problem Based on Simulated Annealing.** European Journal of Operational Research, 86, 480-490, 1995.
- BREEDAM, A. V. **Comparing Descent Heuristics and Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem.** Computers & Operations Research, 28(4), 289-315, 2001.
- CAMPBELL, A. M.; SAVELSBERG, M. **Efficient Insertion Heuristics for Vehicle Routing and Scheduling Problems.** Transportation Science, 38 (3), 369-378, 2004.
- CHRISTIANSEN, C. H.; LYSGAARD, J. **A Column Generation Approach to the Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands.** Logistics/SCM Research Group working paper series, L-2006-04, 2006.
- CHRISTOFIDES, N.; MINGOZZI, A.; TOTH, P.; SANDI, C. **Combinatorial optimization.** John Wiley, Chichester, 1979.
- CHRISTOFIDES, N.; MINGOZZI, A.; TOTH, P. **Exact Algorithms for the Vehicle Routing Problem, Based on Spanning Tree and Shortest Path Relaxation.** Mathematical Programming, 20, 255-282, 1981.
- CHRISTOFIDES, N.; HADJICONSTANTINO, E.; MINGOZZI, A. **A New Exact Algorithm for the Vehicle Routing Problem Based on Q-Paths and K-Shortest Paths Relaxations.** Annals of operations Research, 61 (1), 21-43, 1995.
- CLARKE, G.; WRIGHT, W. J. **Scheduling of Vehicle from a Central Depot to a Number of Delivery Points.** Operations Research, 12, 568-581, 1964.
- CROES, G.A. **A Method for Solving Traveling-Salesman Problems.** Operations Research, 6, 791-812, 1958.
- CUNHA, C. B. **Aspectos Práticos da Aplicação de Modelos de Roteirização de Veículos a Problemas Reais.** Transportes, Rio de Janeiro, 8(2), 51-74, 2000.

DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. **The Truck Dispatching Problem**. Management Science, 6, 80-91, 1959.

DORIGO, M.; CARO, G. D. **The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic**. In D. Corne, M. Dorigo and F. Glover (eds), New Ideas in Optimization, McGraw-Hill, 11-32, 1999.

FISHER, M. L.; JAIKUMAR, R. **A Decomposition Algorithm for Large-Scale Vehicle Routing**. Working Paper 78-11-05, Department of Decision Sciences, University of Pennsylvania, 1978.

FISHER, M. L.; JAIKUMAR, R. **A Generalized Assignment Heuristic for Vehicle Routing**. Networks, 11, 109-124, 1981.

FRANCISCHINI, G. P.; GURGEL, F. A. **Administração de Materiais e do Patrimônio**. 1ª Edição, Thomson Pioneira, São Paulo, 2002.

GALVÃO, A N. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição**. Campus, Rio de Janeiro, 2001.

GAREY, M. D.; JOHNSON, D. S. **Computers and Intractability – A Guide to the Theory of NP-Completeness**. Freeman, San Francisco, 1979.

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

GILLETT, B. E.; MILLER, L. R. **A Heuristic Algorithm for the Vehicle-dispatch Problem**. Operations Research, 22(2), 340-349, 1974.

GOLDEN, B.; MAGNANTI, T.; NGUYEN. H. **Implementing Vehicle Routing Algorithms**. Networks, 7, 113-148, 1977.

HALL, R.W.; PARTYKA, J. **On the Road to Efficiency**. OR/MS Today, 24 (3), 1997.
Disponível em: <http://www.lionhrtpub.com/orms/orms-6-97/Vehicle-Routing.html>.

HALL, R.; PARTYKA, J. **Software Survey: On The Road to Mobility**. OR/MS Today, 35 (1), 2008. Disponível em: <http://www.lionhrtpub.com/orms/orms-2-08/frvrss.html>.

HEINEN, M. R. **Análise e Implementação de Algoritmos para o Roteamento de Veículos**. Anais do IV Simpósio de Informática da Região Centro do RS (SIRC/RS), Santa Maria, RS, UNIFRA Editora, 2005.

LAPORTE, G.; SEMET, F. **Classical Heuristics for the Vehicle Routing Problem**. Group for Research in Decision Analysis, Montreal, Canada, 1998.

LAPORTE, G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J. Y.; SEMET, F. **Classical and Modern Heuristics for the Vehicle Routing Problem**. Operational Research, 7 (4-5), 285-300, 2000.

LIMA, M. P. **Custos logísticos na economia brasileira**. Revista Tecnológica, 64-67, Jan. 2006.

LIN, S. **Computer Solution of the Traveling Salesman Problem**. Bell System Technical Journal, 44, 2245-2269, 1965.

MAGNANTI, T. **Combinatorial Optimization and Vehicle Fleet Planning: Perspectives and Prospects**. Networks, 11 (2), 179-213, 1981.

MARINAKIS, Y.; MIGDALAS, A. **Heuristic Solutions of Vehicle Routing Problems in Supply Chain Management**. Combinatorial and global optimization, Pardalos, P.M., Migdalas, A., Burkard, R. (eds), Scientific World, 205-236, 2002.

MARTÍ, R.; LAGUNA, M.; GLOVER, F. **Principles of Scatter Search**. European Journal of Operational Research, 169, 359-372, 2006.

MOLE, R. H.; JAMESON, S. R. **A Sequential Route-Building Algorithm Employing a Generalized Savings Criterion**. Operational Research Quarterly 27, 503-511, 1976.

NELSON, M. D.; NYGARD, K. E.; GRIFFIN, J. H.; SHREVE, W. E. **Implementation Techniques for the Vehicle Routing Problem.** Computers & Operations Research 12, 273-283, 1985.

NORONHA, T. F. **Uma Abordagem sobre Estratégias Metaheurísticas.** Revista Eletrônica de Iniciação Científica, 1 (1), 2001.

OR, I. **Traveling Salesman-Type Combinatorial Optimization Problems and Their Relation to the Logistics of Regional Blood Banking.** Ph.D. Dissertation, Northwestern University, Evanston, IL, 1976.

OSMAN, I. H. **Metastrategy Simulated Annealing and Tabu Search Algorithms for the Vehicle Routing Problem.** Annals of Operations Research, 41, 421-451, 1993.

POZO, H. **Administração de Recursos Materiais e Patrimoniais – Uma abordagem Logística.** 4ª Edição, Atlas, São Paulo, 2007.

PUREZA, V.; FRANÇA, P. **Uma Abordagem Adaptativa de Busca Tabu Aplicada ao Problema de Roteamento de Veículos.** Transportes, 9 (2), 28-47, 2001.

PUREZA, V.; MORABITO, R. **Desenvolvimento de um Modelo Matemático e um Protótipo Computacional para Planejamento de Rotas de Atendimento.** Relatório Técnico do Projeto Transmute 863*04, FAI-UFSCar, São Carlos, 2008.

REEVES, C. R. **Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems.** John Wiley & Sons. Inc. New York, 1993.

REGO, C. **A Subpath Ejection Method for the Vehicle Routing Problem.** Management Science, 44, 1447-1459, 1998.

RENAUD, J.; BOCTOR, F. F.; LAPORTE, G. **An Improved Petal Heuristic for the Vehicle Routing Problem.** Journal of the Operational Research Society, 47, 329-336, 1996.

- ROCHAT, Y.; TAILLARD, R. E. **Probabilistic Diversification and Intensification in Local Search for Vehicle Routing.** *Journal of Heuristics*, 1, 147–167, 1995.
- RONEN, D. **Perspectives on practical aspects of truck routing and scheduling.** *European Journal of Operational Research*, 35 (2), 137-145, 1988.
- SALHI, S.; RAND, G. K. **Incorporating Vehicle Routing into the Vehicle Fleet Composition Problem.** *European Journal of Operational Research*, 66, 313-330, 1993.
- SANTOS, W. B.; CORDENONSI, A. Z. **Resolução do Problema de Roteamento de Veículos Utilizando a Heurística de Savings.** *REVISTA DO CCEI (Centro de Ciências da Economia e Informática)*, 5 (7), 7-14, 2001.
- SCHOPF, E. C.; SCHEPKE, C.; SILVA, M. L. **Um Estudo da Aplicação de Heurísticas Construtivas e de Melhoramento para um Problema de PRV. III Simpósio de Informática da Região Centro, Santa Maria, RS, Brasil, 2004.**
- SIMAS, E. P. L. **Utilizando a Busca Tabu na Resolução do Problema de Roteamento de Veículos.** *Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada)*, Universidade do Vale do Rio Sinos, São Leopoldo, 2007.
- SOLOMON, M. M. **Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Ttime Window Constraints.** *Operations Research*, 35 (2), 254-265, 1987.
- SOSA, N. G. M.; GALVÃO, R. D.; GANDELMAN, D. A. **Algoritmo de Busca Dispersa Aplicado ao Problema Clássico de Roteamento de Veículos.** *Pesquisa Operacional*, 27, 293-310, 2007.
- STEWART, W.; GOLDEN, B. **A Lagrangean Relaxation Heuristic for Vehicle Routing.** *European Journal of Operational Research*, 15, 84-88, 1984.
- THOMPSON, P. M.; PSARAFTIS, H. N. **Cyclic Transfer Algorithms for Multi-Vehicle Routing and Scheduling Problems.** *Operations Research*, 41, 935-946, 1993.

TOTH, P.; VIGO, D. **Branch-and-bound Algorithms for the Capacitated VRP**. P.

Toth, D. Vigo (eds), *The Vehicle Routing Problem*, SIAM, Philadelphia, 2000.

WARK, P.; HOLT, J. **A Repeated Matching Heuristic for the Vehicle Routing Problem**. *Journal of Operational Research Society*, 45, 1156-1167, 1994.

WREN, A.; HOLLIDAY, A. **Computer Scheduling of Vehicles from One or More Depots to a Number of Delivery Points**. *Operational Research Quarterly*, 23, 333-344, 1972.

YEUN, L. C.; ISMAIL, W. R.; OMAR, K.; ZIROUR, M. **Vehicle Routing Problem: Models and Solutions**. *Journal of Quality Measurement and Analysis – JQMA*, 4 (1), 205-218, 2008.

APÊNDICE I

As tabelas a seguir apresentam os resultados agregados (médios) dos critérios de avaliação (número de clientes atendidos, número de veículos utilizados, número de entregadores designados, distância percorrida, tempo de rota, demanda total atendida e tempo de CPU) para as instâncias tratadas nas seções 5.2.1 e 5.2.2 (Capítulo 5) com tempos máximos de rota iguais a 150, 230 e 480 minutos.

Tabela I.1: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 150 min.

CENÁRIOS	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS	Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 1	70,67	17,67	17,67	1351,94	2538,61	1140,67	8,00
CENÁRIO 2	70,17	17,83	17,83	1353,62	2535,29	2271,33	7,83
CENÁRIO 3	54,33	18,00	18,00	1158,40	2527,07	684,33	5,17
CENÁRIO 4	29,33	6,00	6,00	427,17	880,51	428,00	7,83
CENÁRIO 5	70,67	17,67	17,67	1351,94	2538,61	1140,67	7,83
CENÁRIO 6	27,17	6,00	6,00	437,31	868,97	776,17	5,17

Tabela I.2: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW_{ext} para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 150 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 1	77,67	17,33	24,00	1353,67	2518,67	1267,33	57,33
CENÁRIO 2	76,67	17,50	24,00	1338,87	2504,70	2508,00	59,83
CENÁRIO 3	64,50	18,00	24,33	1240,73	2586,40	910,00	34,17
CENÁRIO 4	35,50	6,00	10,67	417,79	859,45	572,67	57,33
CENÁRIO 5	77,67	17,50	24,00	1355,65	2528,15	1267,33	54,83
CENÁRIO 6	32,33	6,00	10,33	414,08	839,91	1004,00	62,50

Tabela I.3: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 230 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 1	78,67	12,17	12,17	918,44	2665,11	1245,67	2,67
CENÁRIO 2	78,67	14,50	14,50	1054,87	2801,54	2494,33	10,33
CENÁRIO 3	81,67	18,00	18,00	1379,75	3895,75	1258,00	5,33
CENÁRIO 4	50,33	6,00	6,00	493,05	1316,39	804,33	2,67
CENÁRIO 5	78,67	12,50	12,50	945,06	2691,72	1245,67	13,00
CENÁRIO 6	41,00	6,00	6,00	478,93	1208,93	1240,33	2,50

Tabela I.4: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW_{ext} para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 230 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 1	89,50	12,17	21,33	1214,06	2675,73	1469,00	54,50
CENÁRIO 2	89,17	14,50	23,83	1353,08	2809,74	2947,67	57,33
CENÁRIO 3	90,67	18,00	21,00	1468,66	3976,66	1445,67	13,33
CENÁRIO 4	56,50	6,00	10,00	560,92	1319,25	924,33	57,33
CENÁRIO 5	89,50	12,50	21,67	1240,68	2702,34	1469,00	57,17
CENÁRIO 6	46,67	6,00	9,83	553,97	1213,97	1440,33	67,67

Tabela I.5: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 480 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 1	90,67	10,17	10,17	1010,94	3837,61	1494,00	7,83
CENÁRIO 2	90,67	12,83	12,83	1166,64	3993,31	2991,00	2,50
CENÁRIO 3	100,00	9,67	9,67	1027,50	4355,50	1664,00	5,17
CENÁRIO 4	66,67	5,33	5,33	652,42	1959,09	1063,67	5,33
CENÁRIO 5	90,67	10,67	10,67	1048,99	3875,66	1494,00	7,67
CENÁRIO 6	54,50	5,50	5,50	597,44	1782,44	1680,00	10,33

Tabela I.6: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW_{ext} para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 480 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 1	100,00	8,33	12,83	1018,28	3129,95	1664,00	7,83
CENÁRIO 2	97,50	12,00	14,83	1198,90	3673,07	3234,33	7,83
CENÁRIO 3	100,00	9,17	9,67	1020,83	4231,28	1664,00	5,17
CENÁRIO 4	79,83	5,33	8,83	714,15	1995,81	1303,67	13,00
CENÁRIO 5	100,00	9,00	13,33	1071,03	3247,70	1664,00	7,83
CENÁRIO 6	62,33	5,50	7,67	632,51	1787,51	1973,33	13,00

Tabela I.7: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW com passo adicional para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 150 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 1	70,67	17,67	17,67	1351,94	2538,61	1140,67	2,67
CENÁRIO 2	70,17	17,83	17,83	1353,62	2535,29	2271,33	7,67
CENÁRIO 3	55,33	18,00	18,00	1162,57	2541,91	689,67	13,17
CENÁRIO 4	29,33	6,00	6,00	427,17	880,51	428,00	10,50
CENÁRIO 5	70,67	17,67	17,67	1351,94	2538,61	1140,67	7,67
CENÁRIO 6	27,50	6,00	6,00	440,04	875,04	777,17	5,17

Tabela I.8: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW_{ext} com passo adicional para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 150 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 1	77,67	17,33	24,00	1353,67	2518,67	1267,33	54,50
CENÁRIO 2	76,67	17,50	24,00	1338,87	2504,70	2508,00	57,33
CENÁRIO 3	65,67	18,00	24,33	1245,79	2605,45	917,00	33,67
CENÁRIO 4	35,50	6,00	10,67	417,79	859,45	572,67	59,83
CENÁRIO 5	77,67	17,50	24,00	1355,65	2528,15	1267,33	57,33
CENÁRIO 6	32,67	6,00	10,33	416,81	845,98	1005,00	52,17

Tabela I.9: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW com passo adicional para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 230 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 1	78,67	12,17	12,17	918,44	2665,11	1245,67	5,17
CENÁRIO 2	78,67	14,50	14,50	1054,87	2801,54	2494,33	2,67
CENÁRIO 3	82,67	18,00	18,00	1410,87	3946,87	1268,00	7,83
CENÁRIO 4	50,67	6,00	6,00	497,12	1323,79	805,83	7,83
CENÁRIO 5	78,67	12,50	12,50	945,06	2691,72	1245,67	7,83
CENÁRIO 6	41,83	6,00	6,00	517,02	1255,35	1244,00	10,50

Tabela I.10: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW_{ext} com passo adicional para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 230 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 1	89,50	12,17	21,33	1214,06	2675,73	1469,00	54,83
CENÁRIO 2	89,17	14,50	23,83	1353,08	2809,74	2947,67	57,33
CENÁRIO 3	90,67	18,00	21,00	1468,66	3976,66	1445,67	13,33
CENÁRIO 4	56,83	6,00	10,00	564,99	1326,66	925,83	57,17
CENÁRIO 5	89,50	12,50	21,67	1240,68	2702,34	1469,00	65,17
CENÁRIO 6	47,50	6,00	9,83	592,05	1260,39	1444,00	65,00

Tabela I.11: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW com passo adicional para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 480 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 1	91,83	10,17	10,17	1052,83	3984,50	1505,67	7,83
CENÁRIO 2	91,83	12,83	12,83	1208,53	4140,20	3014,33	5,17
CENÁRIO 3	100,00	9,67	9,67	1027,50	4355,50	1664,00	7,83
CENÁRIO 4	67,83	5,33	5,33	691,29	2036,29	1072,83	7,67
CENÁRIO 5	91,83	10,67	10,67	1090,88	4022,54	1505,67	10,33
CENÁRIO 6	55,67	5,50	5,50	652,74	1876,07	1690,33	2,67

Tabela I.12: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW_{ext} com passo adicional para as instâncias baseadas em Solomon (1987) para tempo máximo de rota igual a 480 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 1	100,00	8,33	12,83	1018,28	3129,95	1664,00	15,67
CENÁRIO 2	97,50	12,00	14,83	1198,90	3673,07	3234,33	18,17
CENÁRIO 3	100,00	9,17	9,67	1020,83	4231,28	1664,00	2,50
CENÁRIO 4	81,33	5,33	8,83	782,92	2117,92	1316,17	15,83
CENÁRIO 5	100,00	9,00	13,33	1071,03	3247,70	1664,00	15,83
CENÁRIO 6	63,67	5,50	7,67	686,98	1895,31	1987,00	10,50

Tabela I.13: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 130 min.

CENÁRIOS	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS	Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 2	39,83	18,00	18,00	951,27	2452,06	753,67	18,17
CENÁRIO 3	58,33	18,00	18,00	1135,62	2538,62	701,50	15,67
CENÁRIO 4	24,83	6,00	6,00	337,96	854,63	258,33	12,83
CENÁRIO 5	58,33	18,00	18,00	1135,62	2538,62	701,50	15,50
CENÁRIO 6	16,00	6,00	6,00	337,16	848,49	255,67	15,50

Tabela I.14: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW_{ext} para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 130 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 2	63,33	18,00	37,00	1195,06	2636,90	1551,33	377,83
CENÁRIO 3	75,50	18,00	26,67	1218,54	2583,93	1049,33	101,50
CENÁRIO 4	36,00	6,00	12,50	385,59	869,98	520,67	96,17
CENÁRIO 5	75,83	18,00	25,17	1222,70	2591,92	1056,83	101,33
CENÁRIO 6	31,17	6,00	16,17	380,13	862,68	669,00	369,83

Tabela I.15: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 250 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 2	56,67	18,00	18,00	1174,83	3844,16	1334,67	15,33
CENÁRIO 3	89,17	18,00	18,00	1406,54	3949,54	1271,50	10,33
CENÁRIO 4	24,83	6,00	6,00	337,96	854,63	258,33	12,83
CENÁRIO 5	89,17	18,00	18,00	1406,54	3949,54	1271,50	10,17
CENÁRIO 6	23,00	6,00	6,00	376,05	1293,39	458,67	15,50

Tabela I.16: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW_{ext} para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 250 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 2	81,00	18,00	30,83	1415,64	3992,30	2212,67	145,67
CENÁRIO 3	99,50	17,83	21,50	1451,83	3935,17	1469,00	28,50
CENÁRIO 4	36,00	6,00	12,50	385,59	869,98	520,67	96,17
CENÁRIO 5	98,67	18,00	21,33	1463,01	3966,67	1450,00	26,33
CENÁRIO 6	34,50	6,00	11,83	469,14	1327,14	842,67	140,67

Tabela I.17: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 480 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 2	104,50	17,50	17,50	1478,04	7536,04	3029,00	10,17
CENÁRIO 3	124,00	11,33	11,33	1138,93	4948,27	1904,67	7,67
CENÁRIO 4	74,67	6,00	6,00	647,00	2709,67	1031,33	13,17
CENÁRIO 5	122,33	12,33	12,33	1176,49	4914,49	1869,00	7,83
CENÁRIO 6	39,33	6,00	6,00	503,22	2367,22	932,00	13,00

Tabela I.18: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW_{ext} para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 480 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 2	104,50	17,50	17,50	1478,04	7536,04	3029,00	18,33
CENÁRIO 3	124,00	11,17	11,33	1137,29	4914,62	1904,67	15,67
CENÁRIO 4	75,00	6,00	6,17	648,47	2689,13	1036,33	10,50
CENÁRIO 5	122,33	12,17	12,33	1175,36	4887,86	1869,00	13,00
CENÁRIO 6	39,33	6,00	6,00	503,22	2367,22	932,00	10,33

Tabela I.19: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW com passo adicional para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 150 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 2	40,50	18,00	18,00	975,82	2485,28	758,00	20,83
CENÁRIO 3	59,17	18,00	18,00	1151,27	2561,61	705,17	13,00
CENÁRIO 4	25,33	6,00	6,00	353,92	871,59	258,83	15,83
CENÁRIO 5	59,17	18,00	18,00	1151,27	2561,61	705,17	18,00
CENÁRIO 6	16,33	6,00	6,00	345,79	859,12	256,67	18,17

Tabela I.20: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW_{ext} com passo adicional para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 150 min.

CENÁRIOS	Nº DE CLIENTES ATENDIDOS	Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 2	63,67	18,00	37,00	1206,55	2654,38	1554,33	372,17
CENÁRIO 3	76,33	18,00	26,67	1234,54	2610,60	1054,67	101,33
CENÁRIO 4	36,50	6,00	12,50	396,53	884,92	522,67	96,83
CENÁRIO 5	76,67	18,00	26,83	1238,70	2618,59	1062,17	101,83
CENÁRIO 6	31,17	6,00	16,17	380,13	862,68	669,00	370,00

Tabela I.21: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW com passo adicional para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 230 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 2	58,50	18,00	18,00	1210,21	3916,88	1353,33	15,50
CENÁRIO 3	90,67	18,00	18,00	1450,55	4015,88	1282,67	10,33
CENÁRIO 4	25,33	6,00	6,00	353,92	871,59	258,83	15,83
CENÁRIO 5	90,67	18,00	18,00	1450,55	4015,88	1282,67	10,33
CENÁRIO 6	24,00	6,00	6,00	411,70	1333,70	461,00	20,83

Tabela I.22: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW_{ext} com passo adicional para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 230 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 2	82,00	18,00	30,83	1445,02	4037,02	2220,33	140,67
CENÁRIO 3	100,00	17,83	21,50	1470,36	3955,70	1470,00	26,17
CENÁRIO 4	36,50	6,00	12,50	396,53	884,92	522,67	96,83
CENÁRIO 5	99,17	18,00	21,33	1481,54	3987,20	1451,00	26,00
CENÁRIO 6	35,33	6,00	11,83	499,44	1367,45	847,67	143,17

Tabela I.23: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW com passo adicional para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 480 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 2	106,67	17,50	17,50	1552,04	7675,37	3061,67	8,00
CENÁRIO 3	124,00	11,33	11,33	1138,93	4948,27	1904,67	10,33
CENÁRIO 4	77,67	6,00	6,00	771,34	2871,67	1050,17	7,83
CENÁRIO 5	122,67	12,33	12,33	1180,16	4925,82	1872,83	10,50
CENÁRIO 6	41,50	6,00	6,00	591,28	2474,61	941,67	18,17

Tabela I.24: Resultados computacionais obtidos pelo algoritmo CW_{ext} com passo adicional para as instâncias baseadas em Christofides (1979) para tempo máximo de rota igual a 480 min.

CENÁRIOS	NO DE CLIENTES ATENDIDOS	NO DE VEÍCULOS UTILIZADOS	ENTREGADORES	DISTÂNCIA PERCORRIDA	TEMPO ROTA	DEMANDA TOTAL ATENDIDA	TEMPO CPU
CENÁRIO 2	106,67	17,50	17,50	1552,04	7675,37	3061,67	10,67
CENÁRIO 3	124,00	11,17	11,33	1137,29	4914,62	1904,67	5,17
CENÁRIO 4	77,83	6,00	6,17	763,15	2837,81	1053,33	5,33
CENÁRIO 5	122,67	12,17	12,33	1179,03	4899,19	1872,83	18,33
CENÁRIO 6	41,50	6,00	6,00	591,28	2474,61	941,67	13,00