



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

**Uma abordagem híbrida ao problema de roteirização dinâmica de
veículos com janela de tempo**

Dalton Cherubim Vecchini

Campinas

2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

V49a Vecchini, Dálton Cherubim
Uma abordagem híbrida ao problema de roteirização
dinâmica de veículos com janela de tempo / Dálton
Cherubim Vecchini. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Carlos Alberto Bandeira Guimarães.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Heurística. 2. Distribuição de mercadorias. 3.
Roteiros. 4. Programação heurística. I. Guimarães,
Carlos Alberto Bandeira. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: A hybrid approach to the dynamic vehicle routing problem
with time window

Palavras-chave em Inglês: Heuristic, Distribution of goods, Itineraries, Heuristic
programming

Área de concentração: Transportes

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Carlos Alberto Bandeira Guimarães, Cláudio Barbieri da
Cunha, Diógenes Cortijo Costa

Data da defesa: 12-12-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**Uma abordagem híbrida ao problema de roteirização dinâmica de veículos
com janela de tempo**

Dalton Cherubim Vecchini

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



**Prof. Dr. Carlos Alberto Bandeira Guimarães
Presidente e Orientador(a)/Unicamp**



**Prof. Dr. Cláudio Barbieri da Cunha
EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**



**Prof. Dr. Diógenes Cortijo Costa
Unicamp – Universidade Estadual de Campinas**

Campinas, 12 de dezembro de 2011

Dedicatória

A meus pais, Jurandyr Vecchini e Neusa Cherubim Vecchini, pelo amor e dedicação com que me criaram, principalmente por sempre me mostrarem o valor da educação e dos estudos, essenciais para conquistar meus objetivos.

À minha esposa, Renata, e minhas filhas Júlia e Luísa, pelo apoio e paciência na construção deste trabalho.

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Dr. Carlos Alberto Bandeira Guimarães pela importante orientação para a execução deste trabalho.

A todos os professores que ministraram suas aulas durante o mestrado na Faculdade de Engenharia Civil.

À diretoria da Transportadora Americana, Srs. Celso DelleDonne Luchiari e Carlos Panzan, pela confiança depositada em meu trabalho e pelos investimentos despendidos.

A Ângelo Dorival Canali e Francisco José Magri pelo apoio nos momentos de cansaço.

A Charles G. P. Silva pelo auxílio na extração dos dados e dicas de programação.

Aos colaboradores da Transportadora Americana que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

Ao Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho, grande incentivador deste mestrado.

“Se você pode sonhar, você pode fazer.”

Walt Disney

Resumo

Os problemas dinâmicos de roteirização de veículos com janela de tempo (DVRPTW), derivados dos clássicos problemas de roteirização de veículos (VRP), são conhecidos e estudados há muito tempo. Devido ao barateamento das tecnologias de comunicação, de mapas digitais, a computadores mais rápidos e a sua relevância no dia a dia das empresas de transporte, o interesse da comunidade científica em solucioná-los vem ganhando maior importância e atenção.

Este trabalho estuda as características dos DVRPTW e os tipos de abordagem para sua solução. Posteriormente é estabelecida uma estratégia de abordagem e aplicada uma heurística a um caso prático extraído do levantamento em campo em uma empresa de transporte de carga seca e fracionada na cidade de São Paulo, com o objetivo de reduzir o tempo de atendimento das coletas dinâmicas. Finalmente são realizados comparativos entre a prática e o simulado focando na avaliação do tempo de atendimento, distância percorrida e tempo de processamento.

Palavras-chave: roteirização de veículos com janelas de tempo, roteirização dinâmica, heurísticas, coletas dinâmicas

Abstract

The problems of dynamic vehicle routing with time window (DVRPTW), derived from the classic vehicle routing problem (VRP), are well known and studied for a long time. Due to cheapening of communication technologies, digital maps, faster computers and its relevance in everyday transport companies, the scientific community's interest in solve them is gaining greater importance and attention.

This study shows the characteristics of DVRPTW and the types of approach to its solution. Later it is established a strategy and implemented an heuristic approach to a practical case taken from the field survey in a business of transporting dry cargo and fractionated in São Paulo, aiming to reduce the handling time of dynamics pickups. Finally comparisons are made between the practice and simulated focusing on the evaluation of service time, distance and time processing.

Keywords: vehicle routing with time windows, dynamic routing, heuristics, dynamic pickups

Sumário

1 Introdução	1
1.1 Relevância do Problema	1
1.2 Caracterização do Problema	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo Geral.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Estrutura do Trabalho	4
2 Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Definições e conceitos	5
2.2 Formulação Matemática de um VRPTW.....	6
2.3 Roteirização Dinâmica.....	9
2.4 Diferenças entre roteirização estática e dinâmica.....	10
2.5 Nível de Dinamismo	15
2.5.1 Nível de Dinamismo para sistema sem janela de tempo.....	16
2.5.2 Nível de Dinamismo para sistema com janela de tempo	17
2.5.3 Objetivo Primário e sua relação com o Nível de Dinamismo.....	19
2.6 Classificação dos problemas de roteirização	20
2.6.1 Quanto a disponibilização das informações.....	20
2.6.2 Quanto ao modelo de operação.....	21
2.7 O Problema de Roteirização de Veículos com janela de tempo	23
2.7.1 Versão Estática (VRPTW).....	23
2.7.1.1 Estratégias de Abordagem do VRPTW	24
2.7.1.2 Métodos de Construção de Roteiros	25
2.7.1.3 Métodos de Melhoria de Roteiros.....	28
2.7.1.3 Meta-heurísticas.....	31
2.7.2 Versão Dinâmica (DVRPTW)	32
2.7.2.1 Estratégias de Abordagem do DVRPTW	33
2.8 O Problema de Roteirização de Veículos com frota heterogênea	37
3 Métodos e Técnicas	43
3.1 Visão Geral da Solução.....	43
3.2 Roteirização Estática.....	44
3.3 Designação Dinâmica	48
3.3.1 Geocodificação	48
3.3.2 Política de Atendimento.....	48
3.3.3 Definição do melhor veículo – Política <i>NV</i> orientada ao tempo	49
3.3.4 Determinação do tempo restante de atendimento	51
3.3.5 Cálculo da distância	52
3.4 Roteirização Dinâmica.....	52
3.5 Programação	53

	ix
4 Estudo de Caso	57
4.1 Montagem dos roteiros	57
4.1.1 Veículos de Distribuição.....	57
4.1.2 Veículos de Coleta	60
4.2 Comunicação, Posicionamento e Informação sobre a execução dos Serviços	60
4.3 Central de Coleta	61
4.4 Aplicação da estratégia ao caso prático	63
4.4.1 Período de análise	63
4.4.2 Características	64
4.5 Cenários de Simulação.....	65
5 Análises Comparativas	67
5.1 Tempo de Processamento	67
5.2 Distância Percorrida.....	68
5.2.1 Cenário 1	69
5.2.2 Cenário 2.....	70
5.2.3 Cenário 3.....	71
5.3 Tempo de Atendimento	73
5.3.1 Cenário 1.....	73
5.3.2 Cenário 2.....	74
5.3.3 Cenário 3.....	76
5.4 Resultados	77
6 Considerações finais	79
6.1 Conclusão.....	79
6.2 Sugestões para futuras pesquisas	80
Bibliografia	83
Apêndices	91

Lista de Figuras

Figura 2.1: Objetivos primários e nível de dinamismo.....	19
Figura 2.2: Mudanças do tipo 2-opt.....	29
Figura 2.3: Mudanças do tipo 3-opt.....	29
Figura 2.4: Método 2-opt*	33
Figura 2.5: Característica Dinâmica no VRP.....	33
Figura 2.6: Heurística aplicada ao TSPTW	37
Figura 3.1: Roteiro sem a possibilidade de inserção de novas coletas	46
Figura 3.2: Setorização da região de atendimento	47
Figura 3.3: Política NN orientada ao tempo	49
Figura 3.4: Exemplo de roteiro antes e depois da designação dinâmica	50
Figura 3.5: Fluxograma da Construção dos roteiros	53
Figura 3.6: Fluxograma da Designação e Roteirização Dinâmicas	54
Figura 4.1: Sistema de Roteirização Truckstops®	58
Figura 4.2: Sistema de Roteirização Truckstops® - Detalhamento de algumas rotas.....	59
Figura 4.3: Composição da frota de coleta	60
Figura 4.4: Exemplo de relatório de veículo mostrando serviços já realizados	61
Figura 4.5: Visão macro do processo de coleta de mercadoria.....	62
Figura 4.6: Integração entre mapa digital e posicionamento dos veículos	63
Figura 4.7: Quantidade de veículos por dia	64
Figura 4.8: Quantidade de coletas.....	64

Lista de Tabelas e Gráficos

Tabela 5.1: Tempos de Processamento.....	67
Tabela 5.2: Tempos de Processamento.....	68
Tabela 5.3: Distância Percorrida – Criação dos roteiros e designação manuais.....	68
Gráfico 5.4: Distância Percorrida – Criação dos roteiros e designação manuais	69
Tabela 5.5: Distância Percorrida – Cenário 1	69
Gráfico 5.6: Distância Percorrida – Cenário 1.....	70
Tabela 5.7: Distância Percorrida – Cenário 2	70
Gráfico 5.8: Distância Percorrida – Cenário 2.....	71
Tabela 5.9: Distância Percorrida – Cenário 3	72
Gráfico 5.10: Distância Percorrida – Cenário 3.....	72
Tabela 5.11: Tempo de Atendimento – Cenário 1.....	73
Gráfico 5.12: Redução no Tempo de Atendimento – Cenário 1	74
Tabela 5.13: Tempo de Atendimento – Cenário 2.....	75
Gráfico 5.14: Redução no Tempo de Atendimento – Cenário 2	75
Tabela 5.15: Tempo de Atendimento – Cenário 3.....	76
Gráfico 5.16: Redução no Tempo de Atendimento – Cenário 3	77

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACS	Adapted Combined Savings
AMP	Adaptative Memory Procedure
AOOS	Adapted Optimistic Opportunity Savings
API	Application Programming Interface
AROS	Adapted Realistic Opportunity Savings
BATA	Backtracking Adaptative Threshold Accepting Algorithm
DARP	Dial a Ride Problem
DSCP	Dynamic Stacker Crane Problem
DTSP	Dynamic Travel Salesman Problem with time window
DVRPTW	Dynamic Vehicle Routing Problem with time window
EAMA	Edge Assembly Memetic Algorithm
FCFS	First Come, First Served
FSMVRP	Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem
FSMVRPTW	Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with time window
HCG	Heuristic Column Generation
HFFVRP	Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem
HFVRP	Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem
HFVRPTWSD	Heterogeneous Fleet Vehicle Routing problem with time window and Split Deliveries
HRTR	Heuristic Record to Record
HVRP	Heterogeneous Vehicle Routing Problem
LBTA	List Based Thresold Algorithm
MA	Memetic Algorithm
ND	Nível de Dinamismo
NED	Nível Efetivo de Dinamismo
NN	Nearest Neighbor
PART	Partitioning Policy
SFC	Space Filling Curve
TSP	Travel Salesman Problem
VFMP	Vehicle Fleet Mix Problem
VRP	Vehicle Routing Problem
VRPPD	Vehicle Routing Problem with Pickups and Deliveries
VRPSD	Vehicle Routing Problem with Split Deleveries
VRPTW	Vehicle Routing Problem with time window

1 Introdução

1.1 Relevância do Problema

O uso de modelos matemáticos de otimização para solução dos problemas de roteirização de veículos (*VRP - Vehicle Routing Problem*) em operações de transporte de mercadorias vem sendo estudado há décadas devido a sua complexidade e importância na operação rotineira das empresas de transporte. O VRP é um importante subproblema em uma ampla gama de sistemas de distribuição e muito esforço tem sido dedicado à pesquisa sobre as estratégias de sua solução. No entanto grande parte dessa pesquisa tem trabalhado com ambientes estáticos, ou seja, os dados do problema não estão sujeitos a alterações.

Nos últimos anos devido aos avanços, barateamento e popularização de várias tecnologias, em especial das telecomunicações e dos sistemas de rastreamento, permitiu-se que as empresas se comuniquem com suas tripulações e assim saber a localização de seus veículos praticamente a todo o momento e a um custo relativamente baixo. O acesso à informação é um aspecto de fundamental importância para a estrutura organizacional das empresas. Neste sentido, a utilização de informações mais precisas em tempo real tem diferenciado a tomada de decisão tanto em empresas públicas quanto privadas. Além disto, a larga utilização do comércio eletrônico e a globalização obrigam as instituições e empresas a adotarem uma logística em tempo real.

Aliado ao fato de que um eficiente gerenciamento de sua frota e de seus serviços é fundamental para garantir a competitividade das empresas transportadoras ou prestadoras de serviço, bem como ser um vasto campo para estudos de redução de custos, aumento de produtividade, etc., as empresas aumentaram seu interesse no desenvolvimento e aplicação de soluções que possam otimizar as situações dinâmicas que ocorrem na vida real.

Neste cenário, a utilização de modelos matemáticos que otimizem cenários dinâmicos de roteirização de veículos passa a ganhar espaço no dia a dia das empresas e no interesse da comunidade acadêmica.

1.2 Caracterização do Problema

Atualmente, nas empresas de transporte um problema que vem ganhando importância é o gerenciamento da frota em tempo real. Em geral, as empresas de transporte constroem o itinerário de seus veículos através de algum procedimento, seja este otimizado ou não, através da utilização de *softwares* ou de forma manual baseado nas informações que já estejam disponíveis das entregas e coletas a serem realizadas no próximo turno de trabalho.

Após estes veículos saírem do seu terminal de carga rumo à execução dos serviços, novas solicitações de coletas surgem ao longo do dia, as quais precisam ser analisadas e atribuídas aos roteiros já previamente constituídos de forma a serem atendidas no mesmo dia da solicitação o mais rápido possível e sem que sua inclusão nos roteiros interfira nos serviços já agendados a ponto de sua execução não ser mais possível.

Além disto, cada veículo possui limitantes em seu carregamento que precisam ser respeitados, tais como: capacidade máxima de carregamento; limites de horário de trabalho, velocidade; restrição ou proibição de circulação dos caminhões em áreas urbanas; dentre outros. Cada serviço, seja de entrega ou coleta, possui um horário de funcionamento e um tempo de atendimento, que precisam ser respeitados durante a execução do roteiro e normalmente todo o atendimento é iniciado e finalizado no mesmo dia.

Uma vez que se está tratando de veículos carregados previamente, que já partiram de seu terminal e, portanto, não se encontram em um mesmo local, a troca de serviços entre os veículos não é permitida devido ao tempo e ao custo envolvido na realização de tal tarefa.

Após uma coleta ter sido atribuída a um roteiro, outro fator importante é estabelecer uma forma de comunicação com o motorista informando que um novo serviço precisa ser atendido e que, eventualmente, seu roteiro precisa ser alterado. Em geral, existem várias tecnologias que permitem tal comunicação de forma eficiente, dentre as quais podemos citar o uso de telefones celulares, de rádios e do próprio sistema de rastreamento embarcado nos veículos.

A cada coleta nova que surge este processo é repetido até o final da jornada de trabalho ou até que um horário de corte estipulado pela empresa seja atingido. De qualquer forma existe a

preocupação de que o tempo gasto no processamento destas novas solicitações de coleta seja aceitável no atendimento das necessidades de uma operação real.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Aplicar uma heurística que promova a melhoria na gestão de frota de uma empresa de transporte de carga através da redução do tempo de atendimento das coletas que surgem ao longo da jornada de trabalho após os veículos já terem seus roteiros atribuídos e terem saído do terminal.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Aplicar um modelo computacional que implemente a heurística necessária para a solução em um caso real de uma transportadora que realiza entregas e coletas e onde parte ou a totalidade das coletas sejam dinâmicas.
- Comparar os resultados obtidos através do modelo com os dados reais da operação.
- Avaliar o tempo de resposta do modelo aplicado em relação às necessidades da operação real.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em seis capítulos. No primeiro capítulo é feita uma introdução ao problema a ser tratado, mostrando sua relevância e sua abordagem metodológica, além da definição do objetivo principal e dos objetivos específicos.

No segundo é realizado o levantamento bibliográfico focando nas definições acadêmicas do problema de roteirização dinâmica de veículos com janela de horário e em suas principais características.

O terceiro capítulo relata os detalhes da estratégia a ser adotada, enquanto que no quarto capítulo detalha-se o estudo de caso aplicado em uma transportadora de carga seca e fracionada na região da cidade de São Paulo.

As análises e comparativos entre o modelo aplicado e os dados reais são realizados no quinto capítulo e finalmente no sexto capítulo encontra-se a conclusão do trabalho. Apêndices e anexos trazem ao final detalhamento de algumas heurísticas e os dados reais que foram utilizados na simulação.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Definições e conceitos

O problema fundamental e muito bem estudado em termos de roteirização é, sem dúvida o Problema do Caixeiro Viajante conhecido pela sigla TSP (do inglês: *Travel Salesman Problem*), em que um vendedor precisa visitar um conjunto de cidades e retornar à cidade em que começou e cujo objetivo é minimizar a distância total percorrida pelo vendedor.

O Problema de Roteirização de Veículos, conhecido pela sigla VRP (do inglês: *Vehicle Routing Problem*) é uma generalização do TSP, onde dado um conjunto de clientes que precisam ser visitados e um conjunto de veículos disponíveis, consiste em determinar as rotas destes veículos, visitando um subconjunto dos clientes em uma determinada ordem, onde cada rota começa e finaliza em um mesmo depósito. Além disto, todos os clientes devem ser visitados exatamente uma vez e a demanda total do cliente de uma rota não deve exceder a capacidade do veículo. O objetivo do VRP é minimizar os custos de distribuição (Larsen, 2001).

No dia a dia das operações reais de distribuição, várias outras restrições surgem, como por exemplo, restrições de horário de entrega, restrições de tempo máximo de permanência em um cliente, restrições de tempo máximo de jornada de trabalho, etc., as quais complicam a solução do VRP. Em especial o VRP que envolve o tratamento das chamadas janelas de horário, ou seja, que trata em sua solução o fato de que cada cliente possui um horário de abertura e fechamento dentro do qual o veículo precisa atendê-lo, é conhecido como Problema de Roteirização de Veículos com Janela de Horários e comumente referenciado pela sigla VRPTW (do inglês: *Vehicle Routing Problem with Time Windows*), (Muller, 2010).

2.2 Formulação Matemática de um VRPTW

O Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo (VRPTW) é definido com sendo um grafo $G = (V, A)$, em que $V = C \cup \{v_0, v_{n+1}\}$, sendo $C = \{v_1, \dots, v_n\}$ o conjunto de nós que representam os clientes, e v_0, v_{n+1} os nós que representam o depósito. Já o conjunto $A = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ corresponde aos arcos associados às conexões entre nós.

Em sua formulação nenhum arco pode terminar no nó v_0 (início das rotas) e nenhum arco pode começar no nó v_{n+1} (término das rotas). Um custo c_{ij} e um tempo de viagem t_{ij} estão associados a cada arco (v_i, v_j) pertencente a A . O tempo de viagem t_{ij} pode incluir o tempo de serviço s_i do cliente i .

Um conjunto K de veículos idênticos cuja capacidade é q , está situado no depósito e cada cliente tem uma demanda d_i onde $i \in C$.

Em cada cliente, o início do serviço deve estar dentro de uma janela de tempo $[e_i, l_i]$, $i \in C$. Os veículos devem deixar o depósito no intervalo $[e_0, l_0]$ e retornar durante o intervalo $[e_{n+1}, l_{n+1}]$. Um veículo pode chegar em um cliente antes da sua janela de tempo e esperar sem custo.

Pode-se assumir, que $e_0 = l_0$, isto é, todas as rotas começam no instante 0 e que todos os parâmetros $q, d_i, c_{ij}, t_{ij}, e_i, e l_i$ são inteiros e não negativos.

O VRPTW consiste em construir rotas para os veículos de forma que:

- cada rota inicie e termine no depósito;
- cada cliente pertença somente a uma rota;
- a demanda total de uma rota não exceda a capacidade do veículo;
- o serviço do cliente i comece no intervalo $[e_i, l_i]$, e cada veículo deixe o depósito no instante 0 e retorne ao depósito no intervalo $[e_{n+1}, l_{n+1}]$;
- o número de veículos e o custo total de viagens sejam minimizados.

Considerem-se as seguintes variáveis:

$$X_{ij}^k = 1 \text{ se o veículo } k \text{ percorre o arco } (i, j) \text{ ou } X_{ij}^k = 0, \text{ caso contrário} \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in A$$

$$S_i^k = \text{horário em que o veículo } k \text{ começa a servir o cliente } i, \forall k \in K, \forall i \in C \cup \{v_{n+1}\}$$

O modelo matemático proposto para o VRPTW (Kohl, 1999) é dado por:

Função Objetivo:

$$(1) \min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} X_{ij}^k$$

Sujeito a:

$$(2) \sum_{k \in K} \sum_{j \in C \cup \{v_{n+1}\}, j \neq i} X_{ij}^k = 1, \quad \forall i \in C$$

$$(3) \sum_{i \in C} d_i \sum_{j \in C \cup \{v_{n+1}\}, j \neq i} X_{ij}^k \leq q, \quad \forall k \in K$$

$$(4) \sum_{j \in C \cup \{v_{n+1}\}} X_{0j}^k = 1, \quad \forall k \in K$$

$$(5) \sum_{i \in C \cup \{v_0\}} X_{ih}^k - \sum_{j \in C \cup \{v_{n+1}\}} X_{hj}^k = 0, \quad \forall k \in K, \forall h \in C$$

$$(6) \sum_{i \in C} X_{i,n+1}^k = 1, \quad \forall k \in V$$

$$(7) X_{ij}^k (S_i^k + t_{ij} - S_j^k) \leq 0, \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in A$$

$$(8) e_i \leq S_i^k \leq l_i, \quad \forall k \in K, \forall i \in C \cup \{v_{n+1}\}$$

$$(9) X_{ik}^k \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in A$$

Descrição de cada equação:

A função objetivo (1) busca minimizar a somatória dos custos ou distâncias percorridas pelos veículos.

A restrição (2) garante que todos os clientes são visitados e somente por um veículo.

A restrição (3) determina que a soma das demandas da rota percorrida pelos veículos não seja superior à capacidade q .

A restrição (4) força que todos os veículos deixem o depósito para algum cliente, ou, para o próprio depósito. As rotas artificiais (do depósito ao próprio depósito) são utilizadas se o número de veículos é uma variável. Neste caso, um custo cv é atribuído a cada veículo usado, impondo-se $c_{0,n+1} = -cv$. Se o valor de cv é elevado, o modelo primeiramente minimiza o número de veículos, e em segundo lugar, minimiza o custo total. No entanto, se o número de veículos for um parâmetro fixo, o arco $(0, n+1)$ deve ser removido.

A restrição (5) garante o balanço em cada nó: se um veículo chega ao nó h , um veículo deve deixar o nó h .

A restrição (6) estabelece que todos os veículos devem terminar no nó v_{n+1} (depósito).

A restrição (7) define que se um veículo chega ao nó v_j , o tempo de chegada do nó v_j deve ser superior ao tempo de chegada do nó anterior v_i somado ao tempo de viagem de i a j .

A restrição (8) certifica que todo tempo de chegada está dentro do intervalo da janela de tempo – inclusive para a janela de tempo do nó v_{n+1} (depósito).

Por fim, a restrição (9) exige que as condições de integralidade sejam satisfeitas.

Adaptações podem ser feitas, basicamente na equação (3) para incluir a característica de que cada veículo possui uma capacidade própria que pode ou não ser igual aos demais veículos, ou seja:

Sendo q_i a capacidade do veículo i , a soma das demandas da rota percorrida pelo veículo i não pode ser superior a sua capacidade.

$$(3) \sum_{i \in C} d_i \sum_{j \in C \cup \{v_{n+1}\}, j \neq i} X_{ij}^k \leq q_k, \quad \forall k \in K$$

2.3 Roteirização Dinâmica

O VRP, que foi proposto primeiramente por Dantzig e Ramser em 1959, tem seu foco nos problemas estáticos, onde todas as informações necessárias para a otimização são conhecidas antes das rotas serem construídas e não mudam ao longo do tempo. Na vida real existem operações onde as informações sobre novos pedidos ocorrem enquanto as rotas estão sendo executadas, ou seja, após a otimização do processo ter terminado e quando os veículos encontram-se nas ruas efetuando os serviços.

Existem diversos problemas importantes que precisam ser resolvidos dinamicamente (Berbeglia, 2010):

- Gerenciamento dinâmico de frota: Várias operações em grande escala envolvendo o gerenciamento de veículos necessitam de soluções dinâmicas para a otimização dos serviços de entrega e coleta. Transportadoras de carga e distribuidoras de medicamentos são alguns exemplos.
- Sistemas de distribuição gerenciados: Empresas de distribuição estimam o nível de estoque de seus clientes no sentido de reabastecê-los antes que fiquem vazios. Neste caso, as demandas são conhecidas antecipadamente, e os clientes são estáticos. Entretanto como as demandas podem ser incertas, alguns clientes podem ficar sem estoque e podem precisar de reabastecimento de urgência.
- Couriers: na grande maioria possuem coletas que são solicitadas ao longo do dia e precisam ser atendidas no mesmo dia.
- Empresas de Manutenção: aqui se enquadram serviços como guincho (resgate de veículos), assistência técnica (telefonias, tv a cabo, conserto de eletrodomésticos, etc.), distribuição de gás, manutenção de elevadores, etc.
- Sistemas “*Dial-a-ride*” (“Disque carona”): tais sistemas fornecem serviços de transporte de pessoas, em geral idosos ou deficientes, de um local a outro onde os clientes podem

agendar uma viagem com antecedência (o que seria considerado como caso estático) ou fazer uma solicitação em cima da hora (caso dinâmico).

Embora tenhamos apresentado vários exemplos de problemas dinâmicos, existe uma falta de classificação normativa para esta classe de problemas, o que cria, assim, um grande número de variações, bem como diversas formas de tratamento e resoluções (Moreira, 2008).

2.4 Diferenças entre roteirização estática e dinâmica

Define-se Roteirização Estática de veículos quando as entradas (dados) usadas neste problema não mudam durante a execução do algoritmo de solução e nem durante a eventual execução da rota (Psaraftis, 1998).

Em contrapartida, em uma roteirização dinâmica, as entradas (dados) podem mudar (ou serem atualizado), durante a execução do algoritmo e da eventual execução da rota. Na verdade, a execução do algoritmo e execução da rota são processos que evoluem simultaneamente na situação dinâmica, contrastando com uma situação estática em que o processo anterior (execução do algoritmo) claramente antecede, e não sofre alterações, a execução da rota (Psaraftis, 1998).

Segundo Psaraftis (1998), as principais diferenças são:

1 - A dimensão de tempo é essencial

No problema de roteirização estático, a dimensão do tempo pode ou não ser um fator importante. Se for, o problema estático é normalmente chamado de problema de roteirização e agendamento (do inglês: *scheduling*). No entanto, nem todas as situações estáticas têm uma componente de programação. Na verdade, a maioria dos clássicos problemas de roteirização como o Problema do Caixeiro Viajante (tanto na versão única quanto na múltipla), e do Problema de Roteirização de Veículos não têm um componente de programação. Em todos estes problemas, o tempo é assumido como sendo proporcional às distâncias percorridas e, portanto, não devem ser considerados de forma explícita e separadamente na formulação e solução do problema.

Em contrapartida, em cada problema de roteirização dinâmica de veículos, tendo esta restrição de tempo ou não, o fator tempo é essencial. No mínimo, precisamos saber a localização espacial de todos os veículos em um determinado momento durante a sua programação, em particular, quando as solicitações de novos clientes ou de novos carregamentos forem conhecidas.

2 - Problema pode ser aberto

Em contraste com uma situação estática, na qual a duração do processo de roteirização é mais ou menos delimitada ou conhecida previamente, a duração desse processo em uma situação dinâmica pode não ser delimitada, nem ao menos conhecida. Na verdade, o cenário na roteirização dinâmica é o de um processo aberto, que continua por um período indefinido de tempo. Uma implicação disso é que, enquanto em um problema estático geralmente considera-se que os veículos regressam ao seu depósito, em um problema dinâmico isto nem sempre é considerado.

3 - Informações futuras podem ser imprecisas ou desconhecidas

Em um caso estático pode não haver nenhum componente do "passado", "presente" ou "futuro", especialmente se o problema não tiver um componente de agendamento (do inglês: *scheduling*). Mas mesmo que tenha, as informações de todas as entradas do problema são assumidas como sendo da mesma qualidade, independentemente do local dentro do cronograma que esta entrada acontece (início, meio ou fim). Este não é o problema no caso dinâmico, em que as informações sobre qualquer entrada geralmente são precisas para os eventos que acontecem em tempo real, mas mais experimentais para os eventos que podem ocorrer no futuro. Como em qualquer situação da vida real, o futuro é quase nunca conhecido com certeza em um problema de roteirização de veículos. Informações probabilísticas sobre o futuro podem estar disponíveis (por exemplo, podemos saber a probabilidade de que um determinado cliente irá solicitar serviço em um determinado dia), mas em muitos casos, até mesmo esse tipo de informação pode não existir (uma empresa de táxi à espera de clientes é um exemplo típico).

4 - Eventos de curto prazo são mais importantes

Uma implicação do ponto anterior é que em termos de tomada de decisões em uma situação de roteirização dinâmica, os eventos de curto prazo são mais importantes do que as de longo prazo. Este não é o caso em um ambiente estático, onde devido à uniformidade da qualidade da informação e da falta de atualizações, todas as entradas (seja no início, no meio ou no final do

percurso de um veículo) têm o mesmo peso. Na roteirização dinâmica, seria imprudente imediatamente comprometer os recursos de um veículo (ou seja, decidir atribuir serviços a um veículo) aos requisitos que terão de ser satisfeitos no futuro, porque outros eventos intermediários podem fazer tais decisões se tornarem sub-otimizadas e porque tais informações futuras poderão mudar de qualquer maneira (Larsen, 2000; Lund 1996). Centrando-se mais sobre os eventos de curto prazo é, portanto, um aspecto essencial de um problema dinâmico de roteirização.

5 - Mecanismos de atualização da informação são essenciais

Praticamente todas as entradas para um problema de roteirização dinâmica estão sujeitas a revisão a qualquer momento durante a execução do percurso. Por exemplo, um veículo pode quebrar, o horário de atendimento de um serviço pode ser alterado, devido às condições meteorológicas imprevisíveis, um navio pode não ser capaz de chegar a um determinado porto como estava previsto e assim por diante. Portanto é imperativo que os mecanismos de atualização de informação sejam parte integrante da estrutura do algoritmo e da interface de entrada e saída em uma situação dinâmica. As estruturas de dados e técnicas de gerenciamento de banco de dados que ajudam a revisar as entradas do problema de forma eficiente e a descobrir as consequências de tais revisões são essenciais para um esquema de roteirização dinâmica.

6 – Novo sequenciamento dos serviços e redistribuição aos veículos podem ser necessários

Decisões relativas a novo sequenciamento e mudança de atribuição podem ocorrer em um veículo num problema de roteirização dinâmica. O aparecimento de uma nova entrada pode tornar as decisões já tomadas, sub-otimizadas em relação a um determinado objetivo.

Assim, o aparecimento de uma nova entrada (como um novo pedido do cliente) pode exigir tanto um novo sequenciamento dos serviços de um ou mais veículos e até a mudança de serviços entre os veículos (redistribuição).

Um argumento semelhante pode ser feito sempre que uma entrada desaparece (por exemplo, um pedido é cancelado, o cliente não está presente no local, etc.). Da mesma forma, a exclusão de uma entrada, geralmente requer um novo processo de sequenciamento e até uma redistribuição.

7 - Tempos de computação mais rápidos são necessários

A necessidade de reotimizar rotas e/ou as atribuições dos veículos em uma base contínua em tempo real exige tempos de computação mais rápidos do que os necessários em uma situação estática. Em uma configuração de roteirização estática pode-se realmente se dar ao luxo de esperar por algumas horas a fim de obter a melhor solução. Neste cenário, o problema pode até ser resolvido exatamente, e o código executado em modo *batch*, talvez durante a noite. Este não é o caso de uma situação de roteirização dinâmica, na qual se precisa chegar a uma solução satisfatória o mais rápido possível (muitas vezes em questão de minutos, não horas). Pode-se também querer simular cenários (mais uma vez em tempo real) antes de decidir sobre a ação final.

O tempo de processamento das restrições implica em que a rerroteirização e reatribuição sejam frequentemente realizadas por meio de heurísticas rápidas de inserção, intercâmbio k (*k-interchange*) ou outras similares (Psaraftis,1998).

8 - Mecanismos que evitem uma prorrogação indefinida são essenciais

Eventualmente pode ocorrer de um serviço ser adiado indefinidamente devido à, por exemplo, características geográficas desfavoráveis em relação a outras demandas. Enquanto não há restrições de horário ou de prioridade, e enquanto houver solicitações não servidas perto da localização atual do veículo, um determinado cliente (localizado longe desta área) poderá ser sempre agendado para ser atendido por último.

Há uma variedade de maneiras para aliviar este problema, como por exemplo:

- Restrições de horário (sob a forma de janelas de atendimento, por exemplo) podem geralmente forçar o veículo a atender uma demanda independentemente da localização geográfica em que ponto está.
- Restrições de prioridade, como por exemplo a limitação do número de posições que cada ponto pode ser reatribuído numa rota.

9 - A função objetivo pode ser diferente

O tradicional objetivo de minimizar a distância total percorrida, ou a distância máxima percorrida, ou a duração total da programação num cenário de roteirização estático, pode não ter

sentido em um ambiente dinâmico. Afinal, se o processo for aberto, a duração total da programação poderá ser ilimitada também.

Otimizar somente levando em consideração os dados conhecidos pode ser um caminho razoável para se iniciar caso não haja informações sobre futuras entradas.

10 - As restrições de tempo podem ser diferentes

A principal diferença entre a roteirização estática e roteirização dinâmica em relação às restrições de tempo está no fato de que as restrições de tempo, tais como as janelas de horário de abertura ou especialmente as de fechamento dos serviços, tenderem a ser flexíveis.

Uma restrição de tempo é flexível não só se ela puder ser violada mesmo com algum custo (penalidade) - e isto pode acontecer em um problema estático também - mas também se ela estiver sujeita à atualização durante o processo. Isto se deve ao fato da negação de atendimento a uma solicitação em dado instante, na roteirização dinâmica, ser menos atrativa do que a violação da restrição de tempo. Ou seja, prefere-se atrasar determinada entrega a não atender o cliente, e se isto não for possível se tentará negociar uma nova situação.

11 – A flexibilidade para variar o tamanho da frota de veículos é menor

Em teoria, uma alternativa para evitar negação de serviço a um cliente ou a prorrogação de atendimentos é a de adicionar um veículo para atender esse cliente. No entanto, esta proposição não pode necessariamente ser viável num cenário de roteirização dinâmica, pois pode não ser possível ter acesso a tais recursos em tempo real. Em uma situação estática, o intervalo de tempo entre a execução do algoritmo e execução do percurso é geralmente suficiente para permitir tal determinação a ser feita. Tal flexibilidade geralmente não existe em cenários de roteirização dinâmica. Portanto se os recursos são escassos, alguns clientes receberão menor qualidade de serviço e isso também pode resultar no fenômeno de filas.

12 - Enfileiramento pode se tornar importante

Um sistema de roteirização dinâmico pode, às vezes, tornar-se saturado. Isso acontecerá se a taxa de demanda dos clientes ultrapassar um determinado limite além do qual o sistema simplesmente não consegue lidar com todas as solicitações, sem que sejam criados atrasos excessivos. Neste

caso, qualquer algoritmo que tenta fazer as atribuições e programações de acordo com critérios clássicos da roteirização estática acaba por produzir resultados sem sentido.

Infelizmente, apesar da teoria das filas e da roteirização de veículos serem duas áreas muito estudadas, pouco é conhecido sobre o seu relacionamento, sendo os esforços limitados a modelagem empírica.

2.5 Nível de Dinamismo

Medir o desempenho de um sistema de roteirização dinâmico do veículo não é uma atribuição simples. Em contraste com um sistema de roteirização estático, o problema dinâmico é dependente não só do número de clientes e da distribuição espacial destes, mas também do número de eventos dinâmicos e do momento em que estes eventos de fato ocorrem (Larsen, 2001).

Portanto ter uma medida para descrever o dinamismo de um sistema é muito importante quando se quer analisar o desempenho de um determinado algoritmo sob condições variáveis (dinâmicas). Além disso, será visto adiante que o objetivo de uma otimização varia de acordo com o nível de dinamismo.

Devido às medidas de dinamismo poderem ser inadequadas para descrever a dinâmica de um sistema para outro, este capítulo será dividido em duas seções: uma para sistemas sem janelas de tempo e outra para sistemas com a presença de janelas de tempo.

2.5.1 Nível de Dinamismo para sistema sem janela de tempo

Em um sistema sem janela de tempo, somente três parâmetros são relevantes: o número de clientes estáticos, o número de clientes dinâmicos e o momento de chegada dos pedidos dos clientes dinâmicos. O grau de novas informações solicitadas durante a fase operacional do sistema pode ser usado para avaliar o nível de dinamismo de um sistema.

A medida mais básica para isso em um contexto de roteirização é o número de solicitações dinâmicas em relação ao total de solicitações. Esta relação é chamada de grau de dinamismo (Lund, 2003) e pode ser expressa matematicamente por:

$$ND = \frac{\text{Número de Solicitações Dinâmicas}}{\text{Número Total de Solicitações}}$$

No entanto, esta medida não leva em conta os tempos de chegada da nova solicitação, o que significa que dois sistemas, um em que as solicitações dinâmicas são recebidas no início do planejamento e outro em que ocorrem durante o dia, são percebidos como equivalentes. Naturalmente, em aplicações do mundo real, esses dois cenários são, no entanto, muito diferentes.

Em casos onde houver uma maior incidência de pedidos logo ao início da jornada de trabalho, o algoritmo de otimização terá maiores opções de escolha do caminho mínimo. Já não é o caso, quando os pedidos dinâmicos estiverem distribuídos no período da jornada ou tiverem se acumulado no final da jornada de trabalho do motorista.

Para se reduzir estes efeitos no cálculo do nível de dinamismo, é introduzida uma nova formulação, conhecida como Efetivo Nível de Dinamismo, definida por:

$$NED = \frac{\sum_{i=1}^{n_{im}} \left(\frac{t_i}{T}\right)}{n_{tot}}$$

onde:

t_i é o instante de tempo em que o pedido i é recebido, T é o tempo final da jornada de trabalho.

$n_{tot} = n_{ant} + n_{im}$, sendo n_{ant} o nº de pedidos antecipados enquanto n_{im} representa o nº de pedidos que são recebidos após a saída do veículo.

O grau efetivo de dinamismo representa uma média de quão tarde os pedidos são recebidos em comparação com o último momento possível no qual os pedidos poderiam ser recebidos.

É fácil perceber que:

$$0 \leq NED \leq 1$$

Onde $NED = 0$ significa que o sistema é puramente estático, ao passo que se $NED = 1$, o sistema é totalmente dinâmico já que todas as solicitações são recebidas no tempo inicial 0 (zero) e tempo T respectivamente.

2.5.2 Nível de Dinamismo para sistema com janela de tempo

Em várias aplicações de roteirização de veículos, os serviços solicitados devem ser atendidos (iniciados) dentro de um determinado intervalo de tempo - normalmente referido como Janela de Tempo.

Neste caso, seja o horário no qual a i -ésima solicitação é recebida denotado por t_i , e o horário no qual a janela se inicia por e_i , ao passo em que o horário final da janela seja denotado por l_i , o tempo de reação (r_i) é muito importante e é definido pela diferença entre o horário de recebimento da solicitação (t_i) e o final da janela de horário l_i , ou seja, $r_i = l_i - t_i$.

Desta forma, o efetivo nível de dinamismo precisa ser reformulado de forma a levar em conta o tempo de reação, além de considerar, da mesma forma que definido anteriormente, a incidência de pedidos ao longo da jornada de trabalho.

Portanto:

$$NED_{tw} = \frac{1}{n_{tot}} \sum_{i=1}^{n_{tot}} \left(1 - \frac{r_i}{T}\right)$$

onde:

$r_i = l_i - t_i$, sendo l_i o tempo limite na janela de tempo do pedido i e r_i o tempo de reação.

Da mesma forma é fácil verificar que:

$$0 \leq NED_{tw} \leq 1$$

devido a

$$l_i - t_i \leq T \text{ para } i = 1, 2, 3 \dots n_{tot}$$

Segundo Berbeglia (2010), Jaillet e Wagner (2006) quantificaram o valor de se ter informações prévias num problema de roteirização dinâmica intitulado “*on line* TSP com divulgação de datas”, e análises experimentais sobre o valor de se ter informações prévias sobre as solicitações foram realizadas por Tjokroamidjojo *et al.* (2006) na versão dinâmica do Problema do Operador de Guindaste.

Análises empíricas mostram que a performance na obtenção dos resultados dos métodos aplicados aos problemas dinâmicos tem uma relação direta com o nível de dinamismo dos problemas em questão (Larsen, 2000).

2.5.3 Objetivo Primário e sua relação com o Nível de Dinamismo

Segundo Larsen (2001), os objetivos primários dos sistemas dinâmicos variam de acordo com o seu nível de dinamismo, além de ter uma relação direta com o custo. Larsen ainda propõe que a análise do nível de dinamismo irá permitir a correta seleção do modelo e algoritmo para sua solução, demonstrando em seus estudos computacionais que um aumento no nível de dinamismo resulta em um aumento linear no comprimento das rotas em todas as políticas estudadas.

Serviços como os de emergência (bombeiros, ambulâncias e polícia) e de táxis têm grau de dinamismo próximo a 1 e seu objetivo primário é reduzir o tempo de atendimento, enquanto que sistemas opostos (com dinamismo próximo a zero) têm objetivo de reduzir seus custos.

É interessante observar que nos sistemas com alto nível de dinamismo não existe *a priori* um roteiro construído quando o veículo inicia sua jornada de trabalho. Seu itinerário é montado à medida que as solicitações dinâmicas ocorrem.

Operações como as de correio, entrega de mercadorias (sem solicitação de coletas ao longo do período de trabalho), abastecimento de postos de gasolina são exemplos de sistemas com grau de dinamismo próximo a zero.

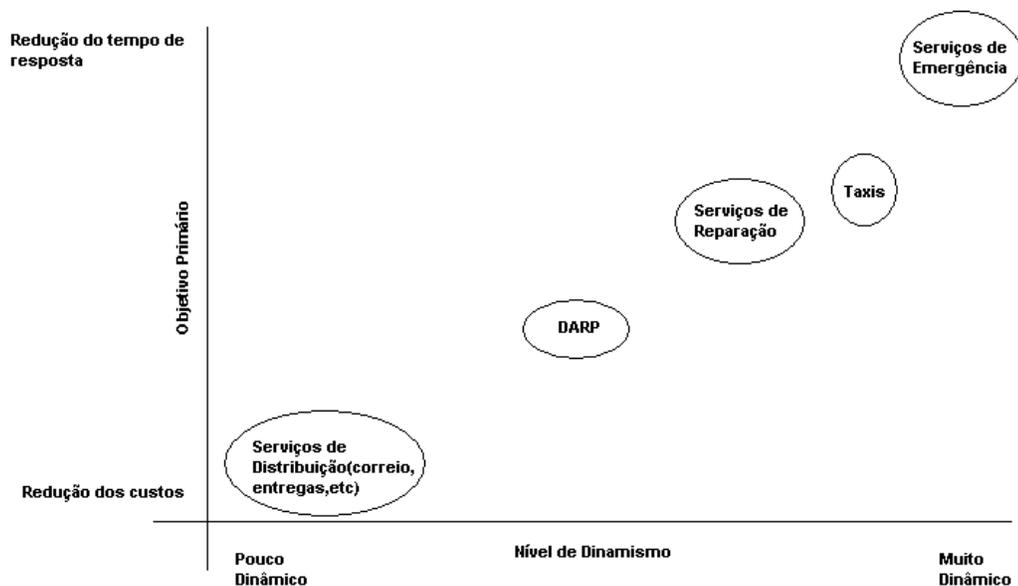


Figura 2.1: Objetivos primários e nível de dinamismo. Fonte: Larsen (2000).

Conforme Larsen (2001), é necessário frisar que em alguns casos, ficar preso a esta rotulagem rigorosamente pode causar mal entendidos ou erros. O problema dinâmico Disque-Carona, conhecido pela sigla DARP (do inglês: *Dial a Ride Problem*), é um exemplo de problema que tem diferentes versões.

A versão conhecida por *Bus DARP* é provavelmente muito mais dinâmica do que ao transporte de idosos ou deficientes (DARP tradicional), uma vez que no primeiro caso as pessoas geralmente tomam a decisão de viajar com menos antecedência enquanto que no segundo grupo a tendência é a de se programarem com bastante antecedência para viajar.

2.6 Classificação dos problemas de roteirização

2.6.1 Quanto à disponibilização das informações

- **Problemas Dinâmicos ou Problemas Estáticos**

Nos problemas de roteirização de veículos estáticos as rotas dos veículos têm que ser montadas de tal forma que visitem um conjunto de clientes com o menor custo possível onde os clientes são conhecidos antecipadamente. Já em um problema de roteirização dinâmico, novas solicitações ocorrem dinamicamente após os veículos já terem saído para a execução das rotas, as quais conseqüentemente precisam ser replanejadas para atender a inclusão das novas solicitações e suas respectivas demandas (Montemanni *et al.*, 2002).

- **Problemas Determinísticos ou Problemas Estocásticos**

Nos problemas determinísticos de roteirização de veículos assume-se que todos os elementos do problema são conhecidos e são determinísticos. Quando um ou mais elementos do VRP são modelados como variáveis aleatórias, para melhor refletir as incertezas que existem na prática, temos um problema estocástico de roteirização de veículos (Novoa, 2006).

Os tempos de viagem entre os clientes e suas respectivas demandas são os elementos de um problema de roteirização de veículos que são mais comumente tratados como aleatórios (Novoa, 2006). Gendreau *et al.*(1996) acrescenta que às vezes o conjunto de quais clientes serão visitados não é conhecido com toda a certeza, logo é tratado como aleatório também.

Os problemas estocásticos de roteirização de veículo mais estudados são o problema de roteirização de veículo com demanda estocástica conhecido pela sigla VRPSD (do inglês: *Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands*) e o problema de roteirização de veículo com clientes estocásticos conhecido pela sigla VRPSC (do inglês: *Vehicle Routing Problem with Stochastic Customers*) (Sungur *et al.*, 2008).

O VRPSD surge em muitas situações práticas, como por exemplo, na entrega de derivados de petróleo, distribuição de gases industriais, entregas de suprimentos em cidades em estado de emergência, entregas em hospitais e restaurantes, etc. (Novoa, 2006). Dado que o VRPSD pode combinar as características de programas estocásticos e de programação inteira, eles são frequentemente considerados como computacionalmente intratáveis (Gendreau *et al.*, 1996).

2.6.2 Quanto ao modelo de operação

Os problemas de roteirização de veículos (VRP) podem ser divididos em 3 categorias (Berbeglia, 2010):

Problemas *Many-to-many* (vários-para-vários)

Onde cada cliente, ou seja, matematicamente falando, cada nó do grafo, pode servir como um ponto de origem (ponto de coleta) ou como destino (ponto de entrega) para qualquer mercadoria. Um exemplo de um problema deste tipo é o Problema de Permuta (Anily e Hassin, 1992). Neste problema, cada nó do grafo contém uma mercadoria bem como um tipo desejado de mercadoria. O problema consiste em construir uma rota de tal forma que, no final do percurso, cada vértice possui um objeto do tipo desejado de mercadoria. Um exemplo prático a ser citado é a roteirização de presidiários, onde o objetivo é apanhar a pessoa no presídio e levá-la a um

tribunal ou fórum. Da mesma forma, em cada fórum, pessoas são apanhadas e precisam ser devolvidas a seus presídios.

Problemas *One-to-many-to-one* (um para vários-vários para um)

Os bens a serem distribuídos estão inicialmente disponíveis em um depósito e são destinados aos clientes, além disso, existem produtos disponíveis nos clientes que precisam ser trazidos para o depósito.

Problemas *One-to-one* (um para um)

Neste caso cada mercadoria (que pode ser vista como um pedido) tem uma dada origem (em geral a mesma para todos) e um destino determinado. São exemplos de problema, operações de correio, distribuição de mercadorias e transporte do tipo porta-a-porta.

Ainda segundo Berbeglia (2010), os problemas dinâmicos de roteirização do tipo *one-to-one* podem ainda ser divididos em três classes:

I - No caso em que os pedidos são referentes a transportes de objetos e os veículos podem atender mais de uma solicitação de uma vez. Normalmente é chamado de problema de roteirização dinâmico de veículos com entregas e coletas (VRPPD).

II - Quando os veículos só podem atender a um pedido a cada saída do terminal. Por exemplo, quando todas as solicitações têm uma carga igual à capacidade do veículo. Neste caso o problema é conhecido por Problema dinâmico do Operador de Guindaste e pela sigla DSCP (do inglês: *Dynamic Stacker Crane Problem*).

Este problema é considerado dinâmico pois as solicitações surgem continuamente ao longo da jornada de trabalho e envolve o planejamento de vários dias de trabalho onde, geralmente, uma boa parcela das solicitações precisam ser atendidas no mesmo dia em que surgem.

Alguns autores referem-se a este tipo de problema como “*Dynamic Full Truckload Pickup and Delivery Problem*”, ou seja, como Problema Dinâmico de carregamento completo de entregas e coletas. No jargão das empresas de transporte este problema é conhecido como Problema de Lotação de Veículos.

Um exemplo complexo e real deste problema foi estudado por Gutenschwager *et al.* (2004) onde se estava estudando o despacho em sistemas elétricos em monotrilho.

III - No caso em que o transporte é de passageiros e chamado de “Disque Carona Dinâmico” - DARP (do inglês: *Dynamic Dial-a-Ride Problem*). Pode-se até dizer que esse problema é o mesmo que o VRPPD, mas a dinâmica do DARP é diferente da do VRPPD quando nos referimos as suas janelas de atendimento que são mais restritas e aos tempos de deslocamento que em geral precisam ser reduzidos para garantir um nível de qualidade aceitável aos usuários.

2.7 O Problema de Roteirização de Veículos com janela de tempo

2.7.1 Versão Estática (VRPTW)

O Problema de Roteirização de veículos com janela de tempo (VRPTW) é um problema de otimização combinatória, cujo objetivo é o planejamento de rotas e distribuição de mercadorias de um depósito de clientes geograficamente dispersos, feito por uma frota de veículos com capacidade limitada. As demandas dos clientes são conhecidas e cada cliente tem uma janela de tempo que deve ser respeitada. As janelas de tempo podem ser consideradas flexíveis (“*soft*”), o que significa que as violações das janelas de tempo são permitidas, mas penalidades são atribuídas a estes casos. O problema é organizar as rotas dos veículos da melhor maneira, ou seja, minimizando os custos totais, que consistem simultaneamente na redução do número de veículos utilizados, na redução da distância total percorrida e da redução das penalidades (Muller, 2010). Todos os parâmetros do problema, tais como locais de demanda e janelas de tempo, são certamente conhecidos (Pavone, 2008).

Da mesma forma que os VRP’s, esta classe de problemas particulares também pertence a categoria de problemas NP-difíceis (“*NP-hard*”), o que significa que sua solução exata requer esforço computacional demasiado (tempo). Apesar desta dificuldade, existem vários métodos exatos disponíveis na literatura. Nagata, Bräysy e Dullaert (2010) citam vários métodos exatos

para solução do VRPTW como, por exemplo, os implementados por Cordeau *et al.* (2002), Bräysy e Gendreau (2005a e 2005b) e Golden *et al.* (2008) e destacam os métodos exatos propostos por Chabrier (2006), Irnich e Villeneuve (2006), Jepsen *et al.* (2006 e 2008) e Kallehaugea (2006). Segundo Larsen (2001b) e Muller (2010) os métodos exatos são divididos em quatro tipos: programação dinâmica (Kolen *et al.*, 1987), Dantzig–Wolfe (*column generation*) (Desrochers *et al.*, 1992; Kohl *et al.*, 1999), Decomposição Lagrangeana (Kohl e Madsen, 1997) e a resolução direta da formulação do modelo clássico.

Uma vez que algoritmos exatos possuem este problema de esforço computacional, o foco das pesquisas recai na obtenção de soluções aproximadas com suficiente precisão e que possam ser obtidas rapidamente (Muller, 2010). Face à dificuldade de se solucionar um VRPTW e a sua ampla aplicabilidade nas situações da vida real, muitas técnicas de solução heurística capazes de produzir soluções de alta qualidade (próximas da ótima) e em tempo limitado tem sido propostas (Pavone, 2008).

Heurísticas são procedimentos de solução que muitas vezes se apoiam em uma abordagem intuitiva, na qual a estrutura particular do problema possa ser considerada e explorada de forma inteligente para a obtenção de uma solução adequada (Cunha, 1997). Assim, na maioria dos casos as heurísticas propostas tendem a ser bastante específicas e particulares para um determinado problema, carecendo de robustez, isto é, não conseguem produzir boas soluções para problemas com características, condicionantes ou restrições pouco diferentes daquelas para as quais foram desenvolvidas (Cunha, 2002).

2.7.1.1 Estratégias de Abordagem do VRPTW

Os métodos heurísticos podem ser classificados em heurísticas de construção de rotas, heurísticas de melhoramento de rotas e meta-heurísticas (Bräysy *et al.*, 2003). Alguns autores consideram ainda um quarto grupo, o dos métodos compostos, em que heurísticas de construção e de melhorias de roteiros são utilizadas de forma conjunta (Cunha, 2002). Exemplos deste quarto grupo podem ser vistos em Russell (1995).

A avaliação de qualquer heurística está sujeita à comparação de um número de critérios relacionados a vários aspectos de performance (Bräysy *et al.*, 2005a). Alguns exemplos destes critérios são tempo de execução, qualidade da solução, robustez, facilidade de implementação e flexibilidade (Barr *et al.*, 1995) (Cordeau *et al.*, 2002). As performances das heurísticas podem ser mostradas em um gráfico bidimensional, no qual a primeira dimensão corresponde ao tempo de processamento e a segunda à qualidade da solução. Neste espaço, os pontos com melhores valores nas duas dimensões são considerados *Pareto Optimal* (Bräysy *et al.*, 2005a).

A maioria das heurísticas para solução do VRPTW usa uma abordagem de duas fases. Primeiro uma heurística de construção é usada para gerar uma solução factível inicial e em seguida uma heurística de melhoria é aplicada à solução inicial.

2.7.1.2 Métodos de Construção de Roteiros

Neste método, os pontos a serem visitados são incluídos no roteiro de modo sequencial, seguindo alguma regra de construção, sem que a solução parcial obtida seja otimizada (Cunha, 2002). Segundo Laporte *et al.* (2000), os métodos de construção podem ser:

Método das economias

Sendo o mais conhecido, o proposto por Clarke e Wright (1964), no qual os pontos a serem visitados vão sendo sucessivamente agrupados, de forma sequencial, para formar um roteiro, com base na ordem decrescente do cálculo de economias decorrentes da sua união que considera a distância de cada um dos pontos ao ponto inicial e também a distância entre eles. Segundo Cunha (2002), testes computacionais realizados com o método das economias e suas variantes proporcionaram as melhores soluções dentre mais de 36 diferentes procedimentos de construção de roteiros que foram comparados em um abrangente experimento computacional.

Método do vizinho mais próximo

No qual o processo inicia-se com a escolha de um ponto a ser visitado através de um critério qualquer (o mais distante, por exemplo) e então, a partir deste, busca-se o ponto mais próximo

ainda não visitado e assim sucessivamente até que todos os pontos sejam visitados, retornando então à sua origem.

Métodos de inserção

Seu mecanismo parte de um roteiro inicial com apenas dois pontos e considerando todos os demais pontos ainda não incluídos no roteiro, seleciona-se para inserção, no roteiro parcial que está sendo construído, aquele que atenda a um determinado critério; por exemplo, o ponto que proporciona o menor acréscimo de distância total percorrida, ou o ponto mais próximo do roteiro, ou o mais distante, ou ainda aquele que forma o maior ângulo com os pontos já inseridos no roteiro. Esse procedimento é repetido sucessivamente, com a análise da inserção entre cada par de pontos do roteiro parcial, até que todos os pontos sejam inseridos no roteiro.

As heurísticas de construção podem ser divididas em métodos sequenciais e paralelos (Schulze, 1999). Algoritmos sequenciais constroem uma rota de cada vez para cada veículo usando um ou mais critérios para decidir qual cliente inserir e em qual posição fazê-lo. Já os algoritmos paralelos constroem as rotas de todos os veículos paralelamente usando uma estimativa prévia para a quantidade de rotas a serem construídas (Bräysy *et al.*, 2004b).

Bräysy *et al.*(2004b) citam que diferentes heurísticas de construção podem ser encontradas em Solomon (1987), Potvin e Rousseau (1993), Bramel e Simchi-Levi (1996), Ioannou, Kritikos e Prastacos (2001), Dullaert e Bräysy *et al.*(2003).

Um dos métodos mais comumente utilizados devido a sua rapidez, simplicidade e qualidade da solução é o método *I1* desenvolvido por Solomon (1987). Detalhes sobre esta heurística estão descritos no Apêndice C. Além da heurística *I1*, Solomon (1987) ainda propõe as heurísticas *I2* e *I3*. Na heurística *I2* é proposto que a seleção dos clientes para inserção no roteiro seja feita de tal forma que minimize a distância total da rota e o tempo total, enquanto que a abordagem da *I3* leva em conta também a urgência do atendimento dos clientes.

Potvin e Rousseau (1993) implementaram uma versão paralela da heurística *I1* de Solomon, onde várias rotas são construídas em paralelo e não sequencialmente uma a uma, e relatam melhorias nos resultados obtidos em relação à versão sequencial. Na versão paralela cada rota é iniciada

com um cliente, chamado de “semente”, ou seja, cada veículo atende a um único cliente inicialmente. Em seguida os clientes ainda não carregados são sequencialmente inseridos em um dos roteiros através de critérios semelhantes aos propostos por Solomon (1987).

Posteriormente Potvin *et al.* (1994) utilizam algoritmos genéticos para identificar quais seriam os parâmetros α_1 , α_2 e μ que geram os melhores resultados. Os autores concluem que os parâmetros encontrados permitem que a heurística *II* paralela gere resultados ainda melhores em cada um dos seis grupos de problemas definidos por Solomon (1987).

Segundo Bräysy *et al.* (2005a), Dullaert (2000) argumenta que o critério de inserção de Solomon ($c_{12}(i, u, j)$) pode não inserir clientes nas melhores posições dentro do roteiro em construção, o que pode causar, num roteiro com relativamente poucos clientes, um maior tempo necessário para se cumprir o roteiro do que o necessário. Dullaert (2000) propõe um novo critério para resolver o problema e conclui que melhores resultados são atingidos. Entretanto, à medida que o número de clientes por rota aumenta, a redução de custo diminui em relação aos resultados obtidos pela heurística *II* original.

Bräysy e Dullaert (2003) descrevem uma heurística que empresta sua ideia básica dos estudos de Solomon (1987) e Russell (1995) onde as rotas são criadas uma a uma e após k clientes serem inseridos no roteiro em construção, este é reordenado usando-se o método *Or-opt* (Or, 1976). Uma vez que os clientes mais distantes do depósito são geralmente os mais difíceis de serem inseridos nas rotas, pois muitas vezes há apenas alguns lugares de inserção viáveis, disponíveis para eles. Bräysy e Dullaert (2003) sugerem que esta heurística favoreça a seleção destes clientes subtraindo-se os custos da distância do cliente ao depósito multiplicada por um parâmetro α_3 definido pelo usuário. Mais formalmente a função c_1 é dada por:

$$c_1(i, u, j) = \alpha_1 c_{11}(i, u, j) + \alpha_2 c_{12}(i, u, j) - \alpha_3 c_{13}(i, u, j), \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \alpha_1 \geq 0, \alpha_2 \geq 0, \alpha_3 > 0$$

onde:

- $c_{11}(i, u, j) = d_{iu} + d_{uj} - d_{ij}$
- $c_{12}(i, u, j) = b_{ju} - b_j$
- $c_{13}(i, u, j) = d_{0u}$

Sendo:

- d_{iu} , d_{uj} e d_{ij} referem-se às distâncias entre os pontos (i, u) , (u, j) e (i, j) respectivamente.
- b_{ju} e b_j correspondem ao tempo total de espera antes e depois da inserção do novo cliente u respectivamente.
- d_{0u} representa a distância do depósito ao cliente u .

2.7.1.3 Métodos de Melhoria de Roteiros

As heurísticas de melhoria para um VRP operam em uma rota de cada vez ou em várias rotas ao mesmo tempo (Laporte *et al.*, 2000) e seu objetivo é melhorar a solução inicial obtida efetuando-se trocas de posição entre as solicitações de uma mesma rota e entre as rotas (Muller, 2010).

Os métodos de melhorias mais utilizados são do tipo *k-opt*, conforme proposto por Lin e Kernighan (1973), nos quais k arcos são removidos de um roteiro e substituídos por outros k arcos, com a finalidade de diminuir a distância total percorrida. O processo termina quando não for possível mais realizar nenhuma troca que resulte em melhoria (Cunha, 2002).

Segundo Laporte *et al.* (2000), Or (1976) propôs outra versão, chamada de *Or-opt*, cuja diferença básica é a de que dado um parâmetro k , todos os arcos de tamanho k ou menores são testados, não se restringindo apenas a arcos de tamanho k .

Johnson e McGeoch (1997) realizaram uma análise empírica minuciosa desses e de outros processos de melhoria e concluíram que uma implementação cuidadosa do método proposto por Lin e Kernighan apresenta os melhores resultados na média (Laporte *et al.*, 2000).

Quanto maior o valor de k , melhor a precisão do método, porém maior também é o tempo de processamento. Na prática são considerados os métodos 2-opt, cujo detalhamento encontra-se no Apêndice B, e 3-opt, isto é, k assumindo os valores 2 ou 3 (Cunha, 2002).

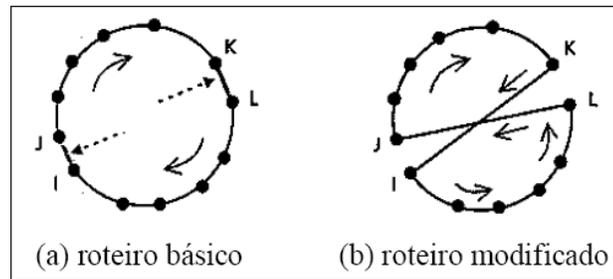


Figura 2.2: Mudanças do tipo 2-opt. Fonte: Novaes (2001) apud Cunha (2002)

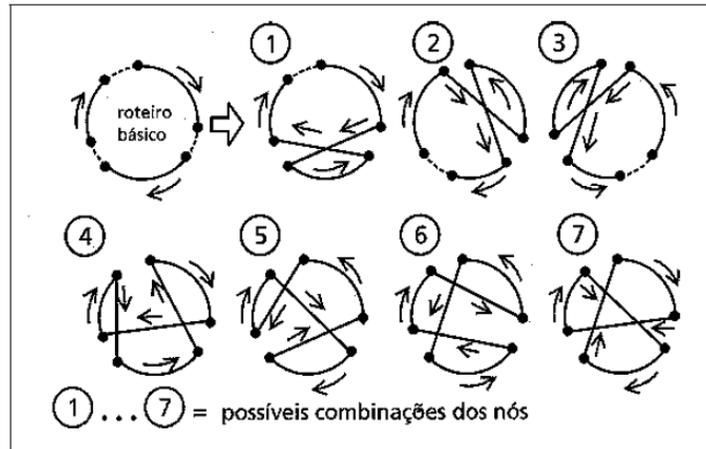


Figura 2.3: Mudanças do tipo 3-opt. Fonte: Novaes (2001) apud Cunha (2002)

Bräysy *et al.* (2005a) relatam que Baker e Schaffer (1986) conduziram estudos mais aprofundados da heurística 2-opt e concluíram que as melhores soluções finais são fornecidas pelas melhores soluções iniciais além do que as maiores economias ocorrem nas mudanças próximas aos pontos selecionados. Neste mesmo estudo, os autores destacam que menos de 10% das melhorias nas soluções envolvem a mudança de orientação da sequência de dois ou mais pontos (clientes) sugerindo, portanto, que adaptações possam ser feitas no método 2-opt com o objetivo de reduzir o tempo de processamento gasto na utilização deste método.

Potvin *et al.* (1995) comparam diferentes heurísticas de intercâmbio como, por exemplo, 2-opt, 3-opt e Or-opt, e sugerem uma nova heurística chamada de 2-opt*. A ideia principal é combinar duas rotas tal que os últimos clientes de uma rota sejam introduzidos após os primeiros clientes da outra rota mantendo-se a orientação das rotas (Bräysy *et al.*, 2005a).

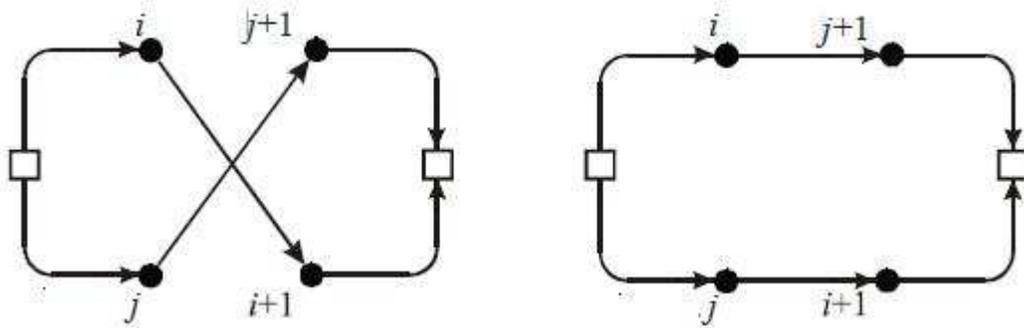


Figura 2.4: Heurística 2-opt*. Fonte: Bräysy *et al.* (2005a)

Bräysy *et al.* (2005a) citam outras variações destes métodos de intercâmbio, como por exemplo: λ -exchange (Osman, 1993), *Cross exchange* (Taillard *et al.*, 1997), *Geni exchange* (Gendreau *et al.*, 1992) e o método *Ejection Chains* (Glover, 1991). Bräysy *et al.* (2003) apresentam uma inovação na abordagem *Ejection Chains* reordenando os pontos após inserção nos casos onde o roteiro se tornou infactível. Segundo Schulze (1999), o método *Cross exchange* generaliza os métodos 2-opt* e Or-opt.

Estes métodos formam uma classe de heurísticas baseadas no conceito de interatividade na busca por melhorias na solução através da exploração de suas vizinhanças. Novas soluções são obtidas através de mudanças nos atributos ou na combinação dos atributos de uma solução, por exemplo, nos arcos que conectam os pares de clientes.

Quando uma solução vizinha é identificada, ela é comparada com a solução atual e se sua solução for melhor ela passa a ser a solução atual. Este processo pode apresentar soluções muito distantes da solução ótima, uma vez que este método é considerado “míope”, pois apenas soluções sequenciais que forneçam reduções na função objetivo são aceitas (Bräysy *et al.*, 2005a).

Bräysy (2002a) descreve várias heurísticas de busca local para o VRPTW usando uma abordagem em três fases. Na primeira fase várias soluções são obtidas através das heurísticas de construção de roteiros com diferentes parâmetros. Na segunda fase, o objetivo é reduzir o número de veículos usados através da abordagem *Ejection Chain* que considera também a reordenação dos pontos nas rotas. Finalmente na terceira fase, o intercâmbio *Or-opt* é usado para reduzir a

distância total dos roteiros. Bons resultados são mostrados para esta heurística quando aplicados aos grupos de problemas de Solomon (1987) (Bräysy *et al.*, 2005a).

Segundo Bräysy *et al.* (2004b) mais exemplos de heurísticas de melhoria podem ser vistos em Thompson e Psaraftis (1993), Potvin e Rousseau (1995), Russell (1995), Shaw (1998), Caseau e Laburthe (1999), Cordone e Wolfer-Calvo (2001) e Bräysy e Gendreau (2002).

2.7.1.3 Meta-heurísticas

Infelizmente os procedimentos simples de inserção nem sempre oferecem boas soluções pois podem ficar restritos a ótimos locais e não globais.

Meta-heurísticas são procedimentos que exploraram o espaço de solução com o objetivo de identificar boas soluções evitando ficar presas a mínimos locais (Shulze, 1999 e Bräysy *et al.*, 2005a), frequentemente incorporando em seus procedimentos algumas das heurísticas de construção e de melhoria.

Uma das consequências desta característica é permitir que a solução atual seja piorada durante o processo de exploração e até permitir que algumas soluções ineficazes aconteçam durante o processo (Gendreau *et al.*, 1999b) (Bräysy *et al.*, 2004b).

Muller (2010) cita em seu trabalho vários exemplos de meta-heurísticas. Por exemplo: “*Simulated annealing*” (Arbelaitz *et al.*, 2001; Czech and Czarnas, 2002; Oliveira *et al.*, 2006; Zhong and Pan, 2007), Busca Tabu (Osman, 1993; Gendreau *et al.*, 1994; Taillard *et al.*, 1997; Toth and Vigo, 1998), Algoritmos de Colônia de Formigas (Colomi *et al.*, 1991; Bullnheimer *et al.*, 1999; Barán e Schaerer, 2003) e Algoritmos Genéticos (Holland, 1975; Jong, 1975; Goldberg e Holland, 1988).

Os algoritmos genéticos pertencem a uma classe conhecida como Algoritmos Evolutivos que são tipicamente divididos em três grupos principais: algoritmos genéticos, estratégias evolucionárias e programação evolucionária (Bräysy *et al.*, 2004b).

Bräysy *et al.* (2005b) relatam inúmeras meta-heurísticas além da Busca Tabu como, por exemplo, GRASP (Kontoravdis e Bard, 1995), Potvin e Robillard (1995) que combinam a heurística de inserção com redes neurais e Bachem *et al.* (1996) que descrevem uma heurística baseada em mecanismo de negociação (*Mechanisms of Trading*).

Gehring *et al.* (2002) apresentam uma meta-heurística para resolver o VRPTW cuja abordagem segue uma estratégia de paralelização de várias pesquisas simultâneas do espaço da solução realizadas com várias meta-heurísticas configuradas de formas diferentes. Os processos são autônomos e as soluções são trocadas entre eles. Os resultados numéricos obtidos mostram que esta meta-heurística se equipara a outros métodos para a resolução do VRPTW com tempo de processamento bastante razoável.

Bräysy *et al.* (2005b) concluem que as meta-heurísticas são melhores que os métodos tradicionais de construção e que os métodos de busca local, usando como parâmetros os conjuntos de dados de Solomon (1987), mas alerta que tomam bastante tempo para chegar à solução final além do tempo necessário para calibrações e implementação. Outro ponto de preocupação quando se considera utilizar meta-heurísticas é quanto à flexibilidade, isto é, o quão bem estas abordagens podem manusear as restrições adicionais que quase sempre surgem em aplicações práticas (Bräysy *et al.*, 2005b).

Nagata, Bräysy e Dullaert (2010) desenvolveram um algoritmo para solução do VRPTW baseado no método conhecido pela sigla EAMA (do inglês: Edge Assembly Memetic Algorithm) originalmente desenvolvido para solução do VRP. Segundo Nagata *et al.* (2010) o MA (*Memetic Algorithm*) é uma heurística de busca que combina algoritmos evolucionários (EA) com busca local e são frequentemente referenciados como algoritmos genéticos híbridos ou busca local genética.

2.7.2 Versão Dinâmica (DVRPTW)

A versão dinâmica do VRP é uma extensão dos problemas de roteirização convencionais, cuja particularidade é a de que as informações podem mudar depois das rotas iniciais terem sido

construídas ou que nem toda a informação é conhecida quando o processo de roteirização ocorre (por exemplo, novas solicitações ocorrem ao longo da jornada de trabalho). O principal interesse neste tipo de problema é sua correspondência a muitas aplicações reais como serviços de reparação, couriers, serviços de táxi, distribuição de mercadorias, etc. (Housroum, 2006).

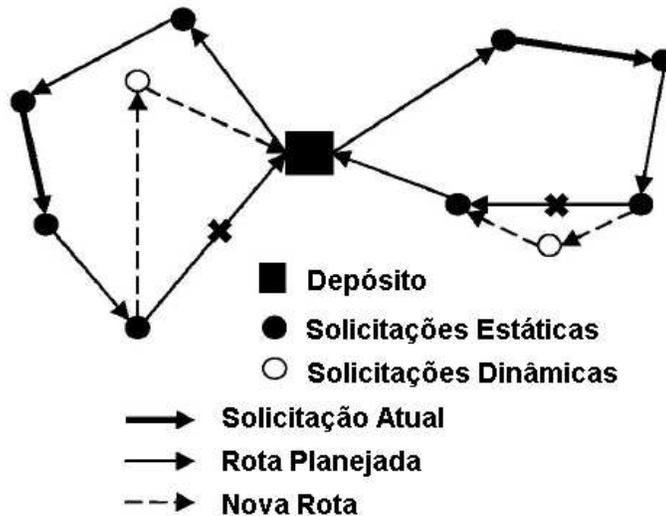


Figura 2.5: Característica Dinâmica no VRP. Fonte: Housroum (2006).

2.7.2.1 Estratégias de Abordagem do DVRPTW

Em problemas dinâmicos de roteirização, o objetivo a ser otimizado é muitas vezes uma combinação de medidas diferentes. Observa-se que, em sistemas fracamente dinâmicos o foco está na minimização do custo de roteirização. Por outro lado, quando a operação é de um sistema altamente dinâmico, minimizar o tempo de resposta esperado (ou seja, a diferença de tempo entre a solicitação e o início do atendimento) torna-se uma questão fundamental (Larsen, 2001). Outro critério significativo que é muitas vezes considerado (sozinho ou combinado com outras medidas) é a otimização de rendimento, ou seja, a maximização do número esperado de solicitações atendidas dentro de um determinado período de tempo (Ghiani, 2003).

A estratégia básica e comumente utilizada para resolver um problema de roteirização dinâmico de veículos é adaptar um algoritmo que resolve a versão estática do problema (Psaraftis, 1998) (Larsen, 2001) (Berbeglia, 2010).

Duas abordagens são comumente usadas:

A primeira consiste em resolver um novo problema estático cada vez que uma nova solicitação surge. Nesta estratégia, pode ser necessário que o algoritmo estático garanta que a nova solução seja factível em relação às decisões passadas. Se estivermos tratando de um problema de entrega de mercadorias, estas não podem ser trocadas de veículo uma vez que estes já saíram do terminal no instante que novas solicitações surgem. Uma desvantagem importante desta estratégia é que a realização de uma roteirização completa pode ser muito demorada e, portanto, inadequada para uma situação real (Berbeglia, 2010).

A segunda abordagem, que é a geralmente usada, é a do algoritmo estático ser aplicado apenas uma vez no início do planejamento para obter uma solução otimizada inicial com as informações disponíveis e, apenas quando novas informações surgirem (novas solicitações), a solução atual ser atualizada através de métodos heurísticos, como a inserção heurística, a heurística de eliminação, a de intercambiamento de posição, muitas vezes aliada a algoritmos de busca local (Berbeglia, 2010). Estes mecanismos de atualização são geralmente mais rápidos permitindo um melhor tempo de resposta para as situações reais (Berbeglia, 2010).

Ghiani (2003) destaca os algoritmos sequenciais como uma classe de métodos importante para se abordar os problemas de roteirização dinâmica e os divide nas seguintes categorias: políticas simples, procedimentos de inserção e meta-heurísticas.

Políticas simples

Políticas de roteirização são regras simples aplicadas repetidamente no processo de otimização, no sentido de atribuir as novas solicitações aos veículos e criar rotas.

Algumas políticas clássicas:

- Primeiro a chegar, Primeiro a ser atendido: Conhecida pela sigla FCFS (do inglês: *First Come, First Served*) onde as demandas são atendidas na ordem em que são solicitadas.

- Fila estocástica mediana: é uma modificação da FCFS, na qual o veículo fica baseado na mediana estocástica da região de atendimento (região onde provavelmente haverá mais solicitações). Quando um pedido ocorre, o veículo se desloca para atendê-lo, retornando à mediana quando terminado.
- Vizinho mais próximo: Conhecida pela sigla NN (do inglês: *Nearest Neighbor*), onde, quando um serviço é atendido, o veículo é deslocado para o vizinho mais próximo que ainda não tenha sido atendido.
- Política TSP (*Travel Salesman Problem*): As solicitações são acumuladas até atingirem um determinado tamanho quando então o processo de otimização é aplicado, sendo as solicitações atendidas através de uma solução otimizada do problema do caixeiro viajante.

Larsen (2000) acrescenta ainda as próximas duas políticas:

- Curva de Preenchimento de Espaços: Conhecida pela sigla SFC (do inglês: *Space Filling Curve*). As demandas são servidas, à medida que forem encontradas, durante varreduras circulares a favor ou contra a direção do movimento do ponteiro do relógio, cobrindo a região de atendimento.
- Política de Particionamento: conhecida pela sigla PART (do inglês: *Partitioning Policy*). A região de atendimento é particionada em micro regiões, nas quais as demandas correspondentes serão atendidas usando uma disciplina FCFS. Não havendo mais demandas na microrregião anterior, o servidor se desloca, seguindo um critério de movimento para a microrregião seguinte onde houver demanda pendente.

Procedimentos clássicos de inserção

Uma vez que os problemas dinâmicos pertencem à classe conhecida como *NP-hard*, os esforços para solucioná-los satisfatoriamente são concentrados em encontrar uma heurística que vai encontrar tal solução em tempo razoavelmente curto (Cunha, 2002).

Yongji *et al.*(2009) afirmam que os melhores métodos que atendem estes quesitos são os métodos de inserção e portanto têm sido utilizados por diversos autores, pois permitem que a inserção de um novo cliente seja na prática, executada com um tempo computacional reduzido (Junior, 2009).

Os procedimentos de inserção, clássico ou em suas variantes, buscam, à medida que novas solicitações são apresentadas, a melhor posição dentro dos roteiros já estabelecidos onde esta nova solicitação possa ser inserida. Uma vez estabelecida tal posição entre as diversas opções, a inserção é realizada e o restante da rota recalculada. O procedimento segue repetidamente até terminarem todas as novas solicitações.

A maioria dos algoritmos aplicados aos problemas dinâmicos de roteirização não permite desviar um veículo do seu destino atual. No entanto, em consequência da chegada de novos pedidos, isso é necessário. A incorporação de desvio em um algoritmo traz também algumas dificuldades tais como recalculas as distâncias, bem como o problema de estimar o tempo alocado para o processo de otimização (Berbeglia, 2010).

Segundo Berbeglia (2010), Ichoua *et al.* (2000) estudaram este caso e criaram um algoritmo que permite desvios. Os autores modificaram um algoritmo de Busca Tabu aplicado a um problema dinâmico, permitindo o desvio do veículo sempre que um novo pedido surge. Os resultados experimentais mostraram que o algoritmo modificado foi capaz de reduzir o número de clientes não atendidos e a distância total percorrida quando comparado com a heurística original.

Larsen (2000) propõe a utilização de um método para solução de um DTSPTW que seja suficientemente rápido a ponto de poder ser implementado para situações dinâmicas reais. Ele implementou uma heurística muito simples que é baseada em intercambiar a ordem em que os pedidos são realizados na rota. A ideia básica é testar se a mudança de posição entre duas solicitações melhora ou não a função objetivo. Se melhorar, a mudança é efetivada, caso contrário não. O algoritmo utilizado por Larsen (2000) é esboçado na Figura 2.6.

Dado uma solicitação i , o parâmetro max_pos controla o número máximo de solicitações que podem ser intercambiadas com a solicitação i , ou seja, se $max_pos = 3$, então é permitido intercambiar a solicitação i com solicitação $i+1$, com a solicitação $i+2$ e finalmente com a solicitação $i+3$. Na implementação o operador MOD efetua o módulo da divisão inteira.

```

interação = 0
melhor_rota_atual = clientes ordenados por janela de horário
repeat
  for i = 0 até clientes do
    for j = 1 até max_pos do
      Esquerda = i
      Direita = (i + j) MOD clientes
      rota_temporária = cliente à esquerda é trocado com cliente à direita
      Cálculo_Custo (rota_temporária)
      if Cálculo_Custo (rota_temporária) < Cálculo_Custo (Melhor_Rota_Atual) then
        Melhor_Rota_Atual = rota_temporária
      End if
      Interação = Interação +1
    End for
  End for
until (interação = max_interação)

```

Figura 2.6: Heurística aplicada ao TSPTW. Fonte: Larsen (2000).

Em muitos problemas dinâmicos algumas informações sobre pedidos futuros seguem uma distribuição de probabilidade. Por exemplo, as solicitações recebidas podem seguir uma distribuição de Poisson. Devido à complexidade do problema, a distribuição de probabilidade exata de eventos futuros nem sempre é conhecida, mas pode ser aproximada através do uso de dados históricos (Van Hentenryck e Bent, 2004;. Hvattum *et al.*, 2006, 2007). Embora os estudos sobre problemas de entrega e coleta dinâmicos e estocásticos sejam muito escassos, houve nos últimos anos um crescente esforço para determinar como a informação estocástica pode ser explorada para melhorar o desempenho de estratégias de solução de um problema dinâmico de roteirização de veículos (Berbeglia, 2010).

2.8 O Problema de Roteirização de Veículos com frota heterogênea

Uma vez que a grande maioria das empresas possui frota heterogênea, o VRP não é muito realista. No problema denominado VFMP (do inglês: *Vehicle Fleet Mix Problem*), a frota é composta por t tipos de veículos. Cada tipo k é definido com uma capacidade Q_k , um custo fixo F_k e um custo variável V_k . O objetivo é encontrar um conjunto de rotas que minimize o custo total. Como no VRP, o número de veículos de cada tipo não é limitado (Prins, 2009).

Há duas classes de VRP com frota heterogênea: a primeira onde a quantidade de veículos de cada tipo é limitada e a outra não, e ambas são “*NP-hard*” pois são extensões do VRP. (Belfiore, 2006).

Se o número de veículos for limitado, temos o problema de roteirização de veículos com frota fixa, conhecido pela sigla HFFVRP (do inglês: *Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem*). Se o número de veículos for ilimitado é necessário determinar o tamanho e composição da frota. Este problema é chamado de problema de dimensionamento e roteirização de uma frota heterogênea de veículos ou FSMVRP (do inglês: *Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem*) (Belfiore, 2006).

Embora sejam muito similares estes dois tipos são usados em diferentes situações: o FSMVRP é mais apropriado para decisões estratégicas onde a empresa quer comprar veículos e precisa definir quantos e de quais tipos comprar, enquanto que o HFFVRP representa melhor uma decisão operacional de quais veículos usar entre os disponíveis no sentido de servir as demandas dos clientes com o menor custo total (Brandão, 2011).

Já segundo Prins (2009), o VRP com frota heterogênea é conhecido pelas siglas HFVRP ou HVRP (do inglês: *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem* ou simplesmente *Heterogeneous Vehicle Routing Problem*). O VFMP pode ser encarado como uma particularização do HVRP onde a quantidade de veículos de cada tipo é igual a n , sendo que existem n rotas com um cliente em cada.

Ao contrário do VRP, a literatura sobre VFMP e HVRP é bastante escassa e confusa, uma vez que vários autores mencionam tratar de HVRP quando na verdade estão tratando de VFMP e usam custos fixos ou variáveis, mas não ambos.

Pessoa *et al.* (2009), citam que a solução de um VFMP precisa satisfazer as seguintes condições: cada rota começa e termina em um depósito, a demanda total dos clientes na rota não pode superar a capacidade do tipo do veículo escolhido e cada cliente é incluído em uma única rota. Brandão (2011) acrescenta ainda as seguintes restrições no caso do HVRP: não permitir o uso de mais veículos do que os disponíveis e satisfazer as demandas dos clientes.

Existem três tipos de VFMP: apenas com custo fixo (VFMP-F), apenas com custos variáveis (VFMP-V) ou com ambos (VFMP-FV). Quando o custo fixo e o variável crescem à medida que a capacidade do veículo cresce, a frota é considerada correlata. É importante citar que os métodos para frotas correlatas não são sempre possíveis de adaptações para trabalhar com frota não correlata (Prins, 2009).

Existem muitas variações do problema de roteirização com frota heterogênea na literatura. Uma lista abrangente pode ser obtida em Paraskevopoulos *et al.* (2008). No caso do FSMVRP várias referências e aplicações podem ser encontradas em Brandão (2009).

Li *et al.* (2007) apresenta vários exemplos de aplicações práticas do HFFVRP. Alguns autores, como por exemplo, Semet e Taillard (1993), Rochat e Semet (1994), Brandão e Mercer (1997), e Oppen e Lokketangen (2008) estudaram problemas reais que podem ser classificados como extensões do HFFVRP uma vez que eles incluíram várias restrições adicionais, como janela de tempo, limite máximo de tempo permitido dirigindo, etc. Diversos exemplos de heurísticas voltadas para a solução do HVRP e HVRPTW podem ser obtidos em Imran *et al.* (2009).

Golden *et al.* (1984) introduziram o VFMP-F e descrevem uma heurística *greedy* (“gulosa”) para sua solução, enquanto Osmar e Salhi (1996) propõem a primeira meta-heurística para o VFMP-F: uma Busca Tabu. Duas outras Buscas Tabus foram analisadas por Gendreau *et al.* (1999) e Wassan e Osman (2002), ambas com resultados promissores para os VFMP-F. Renault e Boctor (2002) elaboraram heurísticas construtivas e procedimentos de melhorias para o VFMP-F.

Li *et al.* (2007) apresentam uma variante de seu próprio algoritmo HRTR (do inglês: *Heuristic Record-to-Record*), inicialmente desenvolvido para a solução do VRP com frota homogênea, assumindo que o número de veículos de cada tipo t é fixo e igual a uma constante (n_t). Na versão com frota fixa do HVRP, os valores de n_t são fixos, mais especificamente, o número de veículos do tipo t é limitado e a composição da frota é conhecida com antecedência.

Li *et al.* (2007) citam, além de seu próprio método, mais três outras heurísticas para a solução do HVRP: HCG (do inglês: *Heuristic Column Generation*), LBTA (do inglês: *List Based Threshold Algorithm*) e BATA (do inglês: *Backtracking Adaptive Threshold Accepting Algorithm*).

Belfiore (2006) relata bons resultados através da implementação da meta-heurística de Busca Dispersa (*Scatter Search*) em problemas com frota heterogênea, janela de tempo e entregas fracionadas. Este tipo de problema é conhecido pela sigla HFVRPTWSD (do inglês: *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with Time Windows and Split Deliveries*). O autor conclui que a utilização de heurísticas construtivas é uma forma simples e rápida de se obter boas soluções iniciais e que a aplicação da meta-heurística *Scatter Search* permitiu não ficar restrito a ótimos locais, encontrando soluções melhores.

O HFVRPTWSD é uma combinação do problema de roteirização com frota heterogênea (HFVRP), do problema de roteirização de veículos com janela de tempo (VRPTW) e do problema de roteirização com entregas fracionadas conhecido pela sigla VRPSD (do inglês: *Vehicle Routing Problem with Split Deliveries*) (Belfiore, 2006).

Segundo Prins (2009) pela primeira vez foi proposta uma abordagem unificada para solução do VRP com frota heterogênea em seu artigo. Ao contrário dos métodos publicados que são limitados a algumas versões, seus algoritmos são capazes de dar conta do VRP, das três versões do VFMP (com custo fixo, com custo variável e com ambos) e do HVRP. Além disto, eles não são limitados a apenas frota correlata.

Prins (2009) apresenta dois algoritmos (algoritmos genéticos mesclados com busca local) que são capazes de resolver tanto o VFMP quanto o HVRP e demonstra que estes métodos conseguem obter soluções melhores que as soluções obtidas pelas mais conhecidas meta-heurísticas.

Dullaert *et al.* (2002) adaptaram a heurística de inserção sequencial *II* de Solomon (1987) para o FSMVRPTW (*FSMVRP with Time Windows*), utilizando o conceito de economia adaptada por Golden *et al.* (1984). Segundo os autores o método apresentou resultados superiores aos obtidos por Golden *et al.* (1984). O critério de inserção $c_1(i, u, j)$ leva em conta o acréscimo de distância $c_{11}(i, u, j)$ e tempo $c_{12}(i, u, j)$ causados pela inserção de um cliente u , além de um terceiro componente $c_{13}(i, u, j)$ que considera um possível acréscimo no custo fixo do veículo. Porém, ao contrário da heurística *II*, não há restrição de que a soma dos pesos $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ seja igual a 1.

O terceiro componente $c_{13}(i, u, j)$ do custo de inserção $c_1(i, u, j)$ é uma adaptação do conceito de economia de Golden *et al.* (1984). Dullaert *et al.* (2002) implementaram 3 variações do conceito

de economia: o conceito de economia combinada adaptada conhecido pela sigla ACS (do inglês: *Adapted Combined Savings*), o conceito de economia de oportunidade otimista adaptada conhecido pela sigla AOOS (do inglês: *Adapted Optimistic Opportunity Savings*) e o conceito de economia de oportunidade realista adaptada, AROS (do inglês: *Adapted Realistic Opportunity Savings*) (Belfiore, 2006).

Brandão (2011) implementa uma heurística de Busca Tabu para o problema de roteirização com frota heterogênea do tipo FSMVRP, onde inicialmente uma grande rota é construída passando-se por todos os clientes e depois particionada em rotas factíveis menores. Posteriormente as rotas passam por um processo de melhoria através da heurística de Busca Tabu onde são incluídos quatro tipos de movimentos: simples, duplos, triplo e permuta. Os movimentos do tipo simples, duplo e triplo procuram inserir grupos de 1, 2 ou 3 clientes consecutivos, respectivamente, de uma rota em outra. Já o movimento de permuta procura realizar uma troca de um cliente de uma rota com outro cliente pertencente a uma rota diferente. Os resultados mostram que a meta-heurística é apropriada e o algoritmo capaz de encontrar soluções de qualidade em um tempo razoável. Brandão (2011) afirma que a resolução do HFFVRP é muito mais difícil que a do FSMVRP e acredita que a Busca Tabu apresentada possa ser adaptada para trabalhar eficientemente com os problemas reais.

Gendreau *et al.* (1999) propõem um algoritmo de Busca Tabu para o HVRP onde o objetivo é determinar a composição da frota de veículos ideal, o que é chamado de FSMVRP por outros autores. O algoritmo apresentado é bastante elaborado constituindo-se de várias fases. Na primeira é usada a heurística GENIUS, desenvolvida para o TSP por Gendreau *et al.* (1992). Na segunda fase são incorporadas diversas estratégias na Busca Tabu e finalmente na terceira fase é aplicada a heurística AMP (do inglês: *Adaptive Memory Procedure*), técnica desenvolvida por Rochat e Taillard (1995) para solução do VRP.

3 Métodos e Técnicas

3.1 Visão Geral da Solução

A estratégia para se alcançar os objetivos estabelecidos neste trabalho será dividida em 3 fases, as quais são descritas sucintamente a seguir:

a) Roteirização Estática

Uma vez conhecidos os serviços a serem realizados no próximo período de trabalho, montam-se os itinerários dos veículos. Cada rota possui uma ordem na qual os serviços devem ser realizados, levando em conta as janelas de horários dos clientes, capacidades dos veículos, velocidade média na região de atendimento, etc.

b) Designação Dinâmica

Após o veículo ter partido de seu terminal, quando surge uma nova solicitação de coleta, esta precisa ser inserida no itinerário de um dos veículos antes dos serviços ainda não atendidos.

A decisão de qual veículo atenderá a solicitação envolve saber qual o veículo consegue chegar mais rapidamente (em menor tempo), com capacidade de atender e cuja inserção não produza um roteiro infactível, ou seja, os serviços restantes (ainda não realizados) precisam ser feitos respeitando-se as janelas de horários dos clientes. Devido às suas características dinâmicas, a este processo dá-se o nome de Designação Dinâmica.

c) Roteirização Dinâmica

Uma vez decidido qual o veículo que atenderá a solicitação, este efetuará um desvio em sua rota original (rota estática), retornando a seu itinerário após o término deste novo atendimento.

Devido a este fato, o restante do itinerário envolvendo os serviços ainda não realizados pode necessitar de uma nova roteirização estática, pois pode ser possível encontrar um novo roteiro

cuja distância a ser percorrida seja menor que a previamente determinada. Para isto considera-se uma nova roteirização estática levando em conta que o ponto de partida do veículo é a atual solicitação (nova solicitação), passando pelos clientes ainda não atendidos e terminando seu roteiro no terminal da empresa.

3.2 Roteirização Estática

Serão considerados os seguintes valores para a confecção dos roteiros:

- **Velocidade:** Considerada velocidade constante em todas as regiões para efeito de simulação.
- **Horário de Trabalho:** o horário de trabalho do veículo é flexível, sendo limitado pelas janelas de atendimentos dos clientes.
- **Capacidades:** Será levada em consideração a capacidade individual de cada veículo pois a frota não é homogênea.
- **Base:** É considerado que todos os veículos saem de uma mesma base e retornam a ela no final de seu expediente.
- **Região de Atendimento:** Será adotada a região de atendimento da filial da empresa que compreende a cidade de São Paulo e grande ABC.
- **Geocodificação dos endereços:** todos os endereços terão latitude e longitude conhecidas no formato decimal.
- **Distância:** como os pontos possuem latitude e longitude, para que o modelo fique mais preciso, a distância será obtida utilizando-se a trigonometria esférica.

- **Janelas de Funcionamento:** será considerada para cada serviço uma janela de funcionamento, dentro da qual o veículo deve atendê-lo.
- **Tempo de Permanência:** Duração do atendimento do serviço em minutos.

A roteirização estática dos veículos será feita em duas etapas:

a) Construção das rotas através de uma heurística de inserção.

Será adotada uma adaptação da heurística *II* de Solomon (1987) para a construção das rotas, com os parâmetros λ , μ , α_1 e α_2 , baseados em seus estudos, pertencentes a dois grupos distintos. No primeiro grupo adotaram-se os parâmetros λ , μ , α_1 e α_2 respectivamente iguais a 2, 1, 0 e 1, e no segundo grupo, respectivamente iguais a 2, 1, 1 e 0.

Em virtude da heurística *II* considerar que a frota é homogênea, será realizada uma adaptação para contemplar o fato dos veículos, no caso prático, possuírem capacidades e custos diferentes (frota heterogênea). A estratégia adotada foi a de construir os roteiros dos veículos ordenados crescentemente em relação ao custo, ou seja, os veículos com menor custo são carregados primeiro.

Segundo Cunha (1996) as heurísticas propostas por Solomon (1987) têm sido bastante utilizadas em aplicações práticas, devidamente adaptadas para as peculiaridades de cada problema. A escolha da heurística *II* de Solomon se justifica não só pelos resultados alcançados, mas também pela simplicidade do método proposto e aparente facilidade de adaptação para incorporação de restrições adicionais. A heurística *II* é detalhada no Apêndice C.

Durante o processo de construção dos roteiros, a cada nova inserção, os horários de atendimento dos serviços afetados são recalculados formalmente, não fazendo-se uso da técnica de *push-forward* (Solomon, 1987).

b) Aplicação de uma heurística de melhoramento às rotas inicialmente obtidas.

Será usada a heurística desenvolvida por Lin e Kernighan (1973) conhecida por 2-opt, na qual pares de pontos consecutivos têm seus arcos invertidos com outros pares consecutivos na busca de roteiros factíveis com redução de custo. O apêndice B detalha a heurística 2-opt.

Verificou-se nos testes iniciais que se os únicos limitantes forem a capacidade do veículo e os horários (janela de atendimento) dos clientes, o algoritmo reduz a quantidade de veículos, mas deixa cada um de seus itinerários sem a possibilidade de inserção de novas coletas ao longo do dia sem que o roteiro passe a ser infactível, ou seja, sem que os horários de atendimento sejam respeitados. A Figura 3.1 mostra um roteiro extenso e factível, mas sem a possibilidade de inclusão de novas coletas.

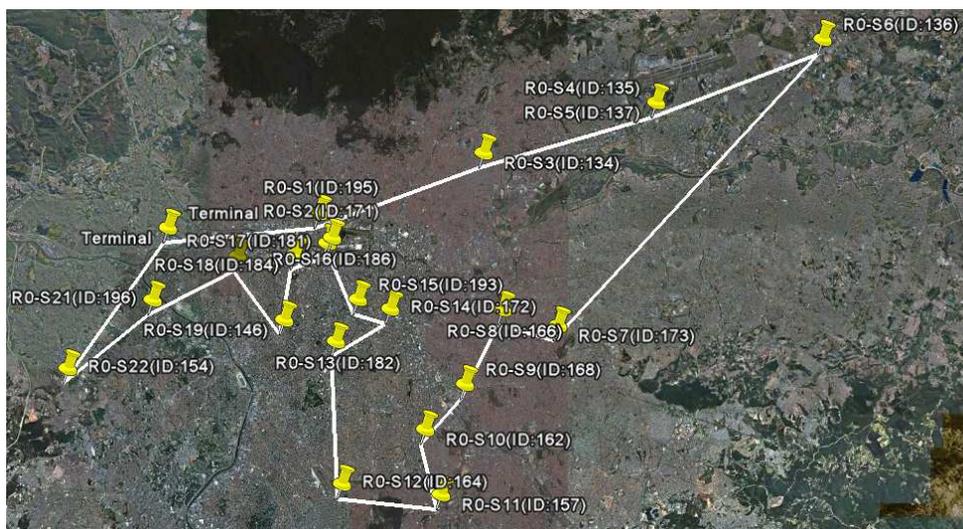


Figura 3.1: Roteiro sem a possibilidade de inserção de novas coletas

Desta forma a única possibilidade de atender às novas solicitações seria com o envio de veículos que estivessem vazios e parados no terminal, o que não seria interessante uma vez que estes veículos somente atenderiam as coletas dinâmicas e as possibilidades de atendê-las com os demais veículos seriam reduzidas. Para se contornar esta questão foi imposto arbitrariamente um limite no horário máximo até o qual os itinerários criados inicialmente podem atender os clientes. Este limite foi estabelecido como sendo 14:30 h, baseado no fato da grande maioria das coletas terem janela de atendimento das 08:00 h as 18:00 h e desta forma restarem 3,5 horas de folga para inserção das novas coletas. Este valor arbitrário pode ser modificado para atender outras

operações com características diferentes da estudada, como por exemplo, contemplar situações onde seja importante ter mais veículos na rua para tentar reduzir o custo com horas extras.

Através das análises preliminares dos roteiros construídos pode-se perceber que alguns roteiros, apesar de factíveis, não são práticos ou são de difícil execução, pois necessitam que o veículo se desloque bastante pela cidade ficando sujeitos a uma grande quantidade de eventos como congestionamentos causados por chuvas, acidentes, excesso de veículos, etc., que podem contribuir para aumentar a chance do roteiro não ser cumprido.

Para minimizar estes efeitos, a cidade foi dividida em setores e foi adotada a estratégia de montar itinerários iniciais mantendo-se o veículo no atendimento de apenas um setor. Esta setorização não foi adotada para a designação das coletas pois isto faria com que reduções maiores no tempo de atendimento fossem perdidas além do fato de aumentar as chances de uma coleta dinâmica não ser atendida em razão da redução do universo de veículos disponíveis. Não foi imposta aos veículos qualquer limitação de atendimento de algum setor, ou seja, qualquer veículo pode atender a qualquer setor.



Figura 3.2: Setorização da região de atendimento

Os setores criados são mostrados de forma esquemática na Figura 3.2 e foram criados através de critério apenas geográfico baseado na experiência de distribuição em São Paulo na empresa estudada.

3.3 Designação Dinâmica

Esta etapa ocorre cada vez que uma nova solicitação surge e consiste em determinar qual será o veículo que deverá atendê-la.

3.3.1 Geocodificação

Geocodificação é o processo de conversão de endereços em coordenadas geográficas utilizadas em geral para posicionamento em um mapa. Possuir as coordenadas dos locais que precisam ser visitados pelos veículos é essencial para o processo de designação e também de roteirização. Existem diversas formas de se obter a geocodificação de um endereço. Nesta estratégia, os novos endereços serão submetidos às rotinas de geocodificação do sistema *Google Maps*®.

O *Google Maps*® é um serviço de pesquisa e visualização de mapas e imagens de satélite da Terra gratuito na internet, fornecido e desenvolvido pela empresa *Google*®. O *Google Maps*® possui várias *API*'s (do inglês *Application Programming Interface*) que permitem que você incorpore funcionalidades a seus próprios *sites* e a aplicativos.

A adoção destas *API*'s se dá devido aos seguintes aspectos:

- facilidade de integração com ferramentas de programação permitindo automatização do processo de geocodificação;
- facilidade e praticidade de uso; e
- gratuidade.

3.3.2 Política de Atendimento

À medida que as novas solicitações forem surgindo, estas serão atendidas pela política FCFS (do inglês: *First Come, First Served*), ou seja, serão atendidas na ordem em que entram na fila.

Para se evitar distorções deste tipo adota-se uma política de atendimento que considera o tempo de deslocamento do veículo até a nova solicitação somado ao tempo que este veículo ainda estará indisponível, ou seja, somado ao tempo restante para o serviço atual ser finalizado. Este tempo de atendimento, chamado de T_{at} , é determinado então por:

$$T_{at} = T_d + T_{term}$$

O tempo de deslocamento T_d é calculado através da velocidade e da distância, e o tempo de término T_{term} é a diferença entre o horário atual e a estimativa de término do atendimento do serviço atual. Portanto o melhor veículo será agora o veículo que consegue chegar na nova solicitação no menor tempo possível, o que não necessariamente será o veículo mais próximo. Esta nova política é conhecida como vizinho mais próximo orientado ao tempo.

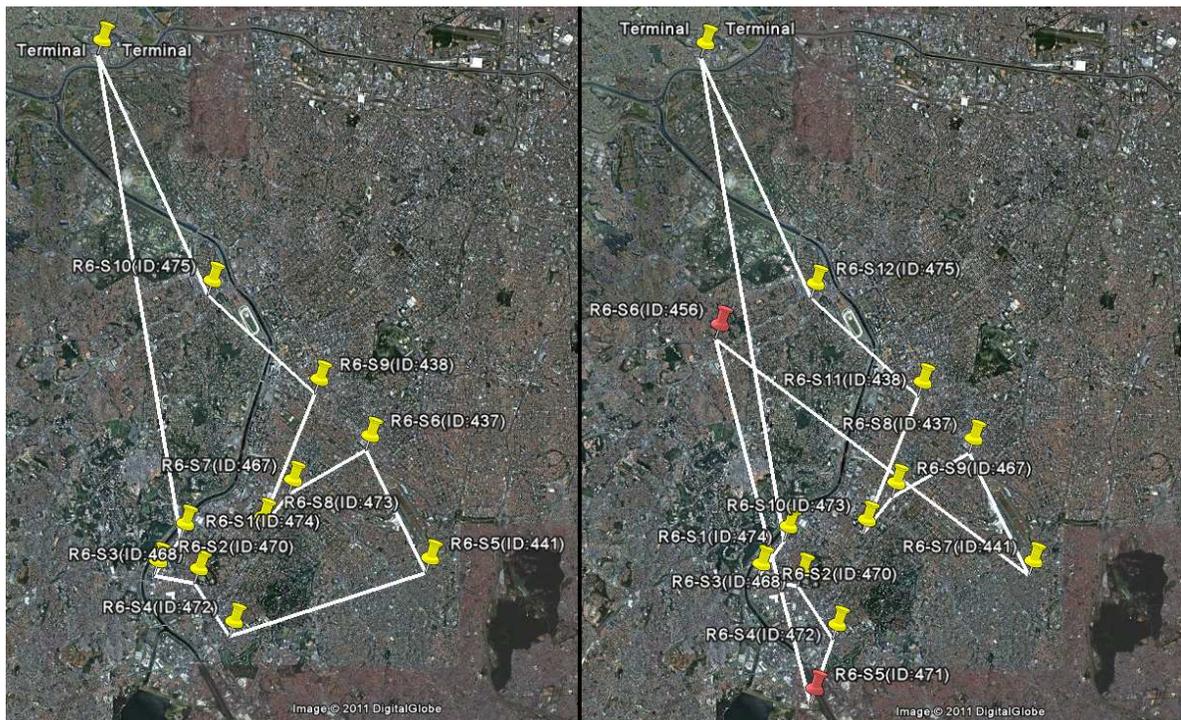


Figura 3.4: Exemplo de roteiro antes e depois da designação dinâmica

Vale destacar que se algum roteiro inicial já possuir um serviço no mesmo local (cliente) de uma nova coleta dinâmica, esta nova coleta será designada para este veículo mesmo que isto não gere a menor redução possível no tempo de atendimento. Esta determinação é necessária para deixar o modelo mais realista e mais próximo ao que foi levantado durante os estudos da operação na prática.

Por questões de coerência (custo e praticidade), no dia-a-dia as empresas evitam ao máximo enviar mais de um veículo a um mesmo local de coleta. É natural também esperar que, neste caso, o cliente não se importará se houver algum impacto no tempo de atendimento de sua nova solicitação, entendendo que ambas foram realizadas pelo mesmo veículo.

3.3.4 Determinação do tempo restante de atendimento

Cada um dos serviços possui um tempo de atendimento estimado, durante o qual o veículo fica parado no cliente realizando a entrega ou coleta. A este tempo dá-se o nome de tempo de parada (T_{parada}).

Caso, no momento que uma nova solicitação surgir, o veículo esteja realizando um serviço, o tempo restante para este atendimento ser realizado (T_{term}) é obtido através da diferença entre o horário no qual a nova solicitação surge no sistema (H_{ns}) e o horário de término do serviço (H_{term}). Este último por sua vez é obtido pelo horário de chegada no cliente ($H_{chegada}$) somado ao tempo de parada. Matematicamente temos que:

$$T_{term} = H_{term} - H_{ns}$$

$$H_{term} = H_{chegada} + T_{parada}$$

Portanto:

$$T_{term} = H_{chegada} + T_{parada} - H_{ns}$$

3.3.5 Cálculo da distância

Como visto no item anterior, saber a distância entre dois pontos será primordial para a solução do problema de designação. Da mesma forma que na roteirização estática, a distância será determinada através da fórmula de distância baseada na trigonometria esférica.

Dados uma origem O e um destino D , a distância entre eles é obtida através da fórmula:

$$D = \text{ArcCos} (\text{Cos}(\text{Lat}_O) * \text{Cos}(\text{Lat}_D) + \text{Sen}(\text{Lat}_O) * \text{Sen}(\text{Lat}_D) * \text{Cos}(\text{Long}_D - \text{Long}_O)) * 111,19$$

Foi cogitado no início do desenvolvimento em se usar a distância real baseada nas *APTs* do *Google Maps*®, mas como existe um limite máximo de solicitações de cálculo de distância por dia, que não seria suficiente para ser aplicado ao modelo, esta estratégia precisou ser abandonada.

3.4 Roteirização Dinâmica

A inserção de uma nova solicitação no roteiro de um veículo somente poderá ser realizada se os serviços ainda não atendidos puderem ser realizados, ou seja, a solução precisa continuar factível. Desta forma, após se avaliar qual o melhor veículo para o atendimento da nova solicitação, os demais serviços precisam ser roteirizados novamente para que seja possível verificar tal factibilidade.

Adota-se para este caso um roteiro iniciando na nova solicitação inserida no veículo, como se esta fosse o terminal de partida, passando pelos demais serviços já ordenados segundo a roteirização original e terminando no terminal da empresa propriamente dito. Como já possuímos um roteiro previamente otimizado não é necessário construí-lo novamente, bastando passar para a fase de refinamento onde usaremos a heurística 2-opt, da mesma forma que citado na roteirização estática.

Caso o itinerário final consiga atender a todas as solicitações previamente carregadas no veículo e que ainda não foram atendidas, o roteiro é efetivado e o processo fica no aguardo de novas solicitações para se iniciar um novo ciclo. Caso não se consiga a factibilidade, o processo se repete agora utilizando-se um outro veículo.

3.5 Programação

Para desenvolvimento das rotinas necessárias será utilizado o *Microsoft® Visual Studio 2003* através da linguagem *Visual Basic 6.0* e para o armazenamento dos dados será utilizado um banco de dados *Microsoft® Access 2000*. Todo o processamento será efetuado em um computador com processador *Intel® Core 2 Duo* de 2.2GHz com 2 GB de memória RAM.

A seguir são exibidos os fluxogramas de construção de roteiros, roteirização e designação dinâmica.

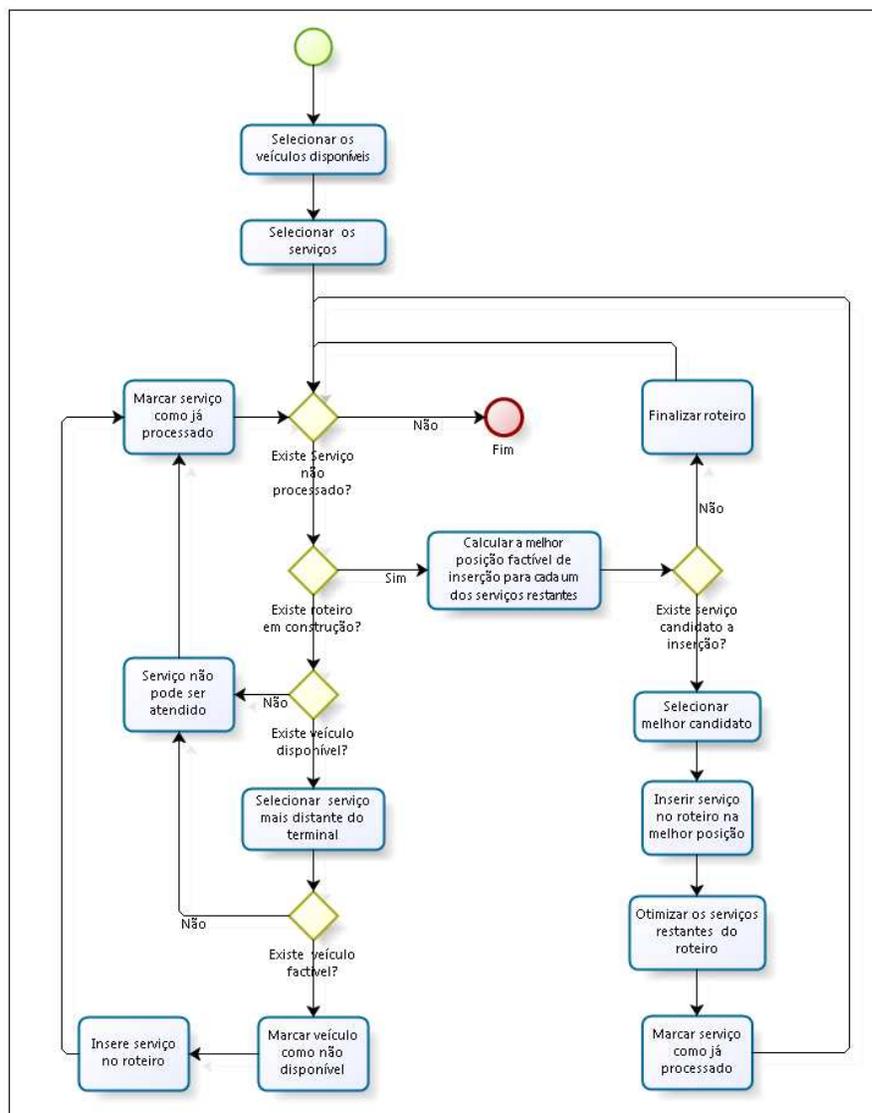


Figura 3.5: Fluxograma da Construção dos roteiros

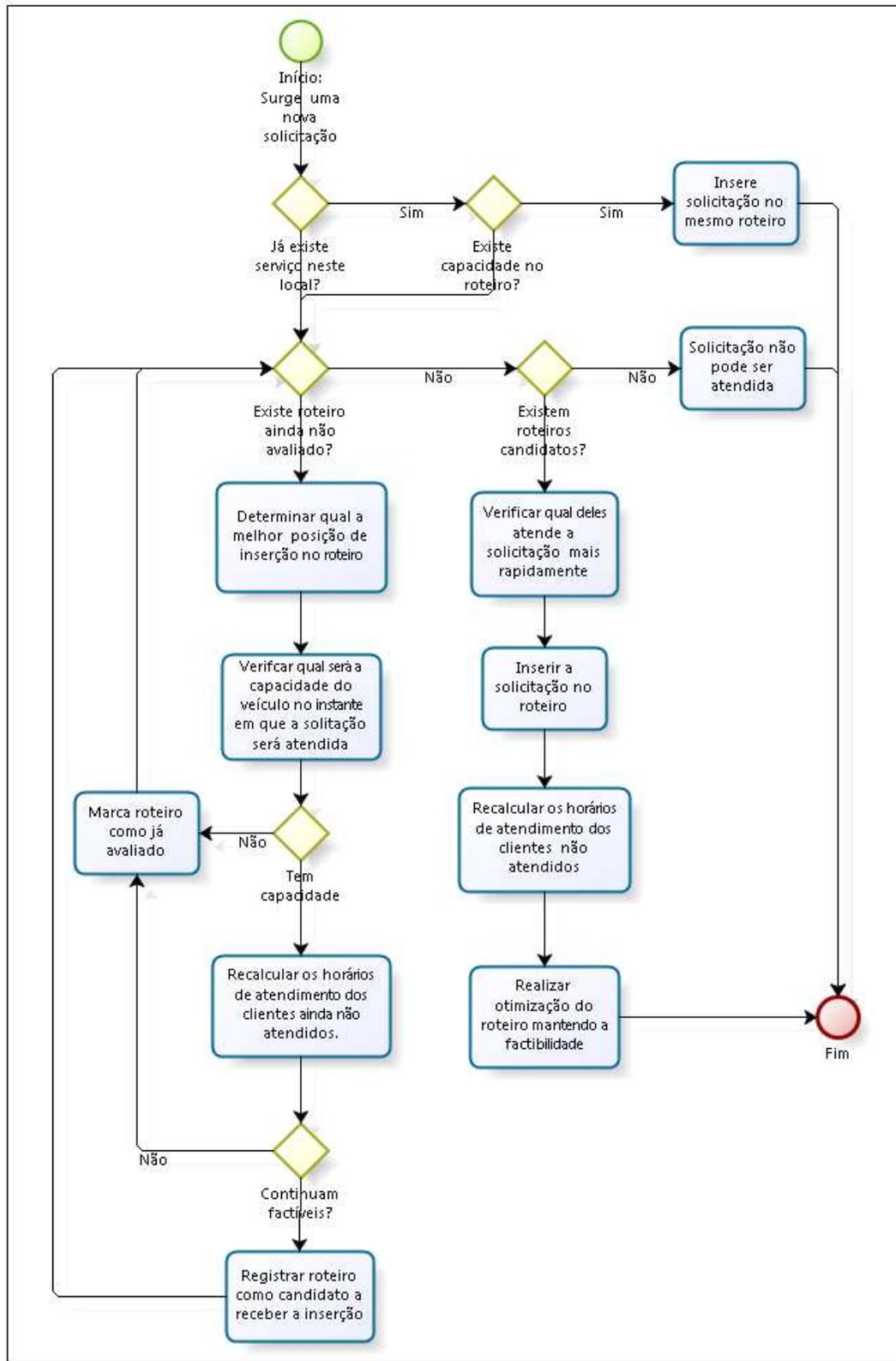


Figura 3.6: Fluxograma da Designação e Roteirização Dinâmicas

O banco de dados possuirá tabelas para armazenagem dos seguintes dados:

- veículos disponíveis;
- serviços previamente conhecidos;
- novas solicitações; e
- roteiros.

O sistema possuirá módulos que serão responsáveis pelas seguintes tarefas:

- Geocodificar;
- Construir os roteiros;
- Gerenciar as novas solicitações;
- Realizar a designação dinâmica;
- Avaliar a factibilidade após a inserção;
- Refinar o roteiro final; e
- Efetivar o roteiro.

4 Estudo de Caso

Para o estudo de caso foi selecionada uma empresa de transporte de carga seca e fracionada estabelecida na cidade de São Paulo que possui uma operação típica de entrega e coleta de mercadorias. Neste capítulo serão mostradas em detalhes as etapas atualmente adotadas pela empresa para confecção dos roteiros e inclusão das coletas dinâmicas que surgem ao longo do dia.

4.1 Montagem dos roteiros

4.1.1 Veículos de Distribuição

Diariamente os dados de todas as entregas a serem realizadas no dia seguinte são enviados para um departamento que é responsável por montar os roteiros dos veículos de distribuição. Tal montagem é realizada através de um sistema de roteirização chamado *Truckstops*® que leva em consideração principalmente as seguintes variáveis em seu processo:

Veículos:

- Identificação: placa, número de frota, etc.
- Capacidades de carregamento: peso, gerenciamento de risco, dimensão, etc.
- Custos: fixo, por serviço, por hora, por quilômetro, etc.
- Horário inicial e final de trabalho (jornada de trabalho).

Entregas ou Coletas:

- Identificação do serviço (nome, CNPJ, etc.).
- Distância entre os pontos a serem atendidos.

- Latitude e longitude dos clientes.
- Horário de funcionamento dos clientes (janela de tempo).
- Tempo de atendimento de cada ponto de parada.
- Quantidade a ser entregue ou coletada.
- Particularidades do cliente.
- Valor da mercadoria

Ambiente:

- Restrições de circulação de veículos
- Velocidade Média
- Fator de correção para o cálculo de distâncias
- Obstáculos que influenciem a circulação dos veículos (pontes, rios, montanhas, etc.)

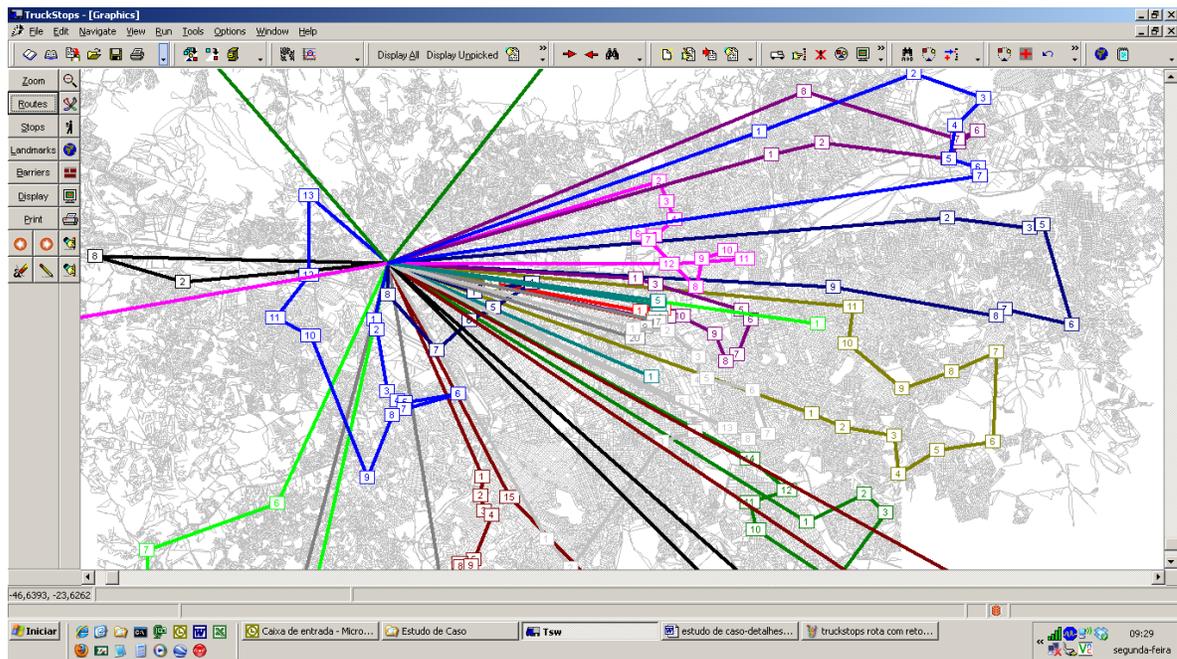


Figura 4.1: Sistema de Roteirização Truckstops®

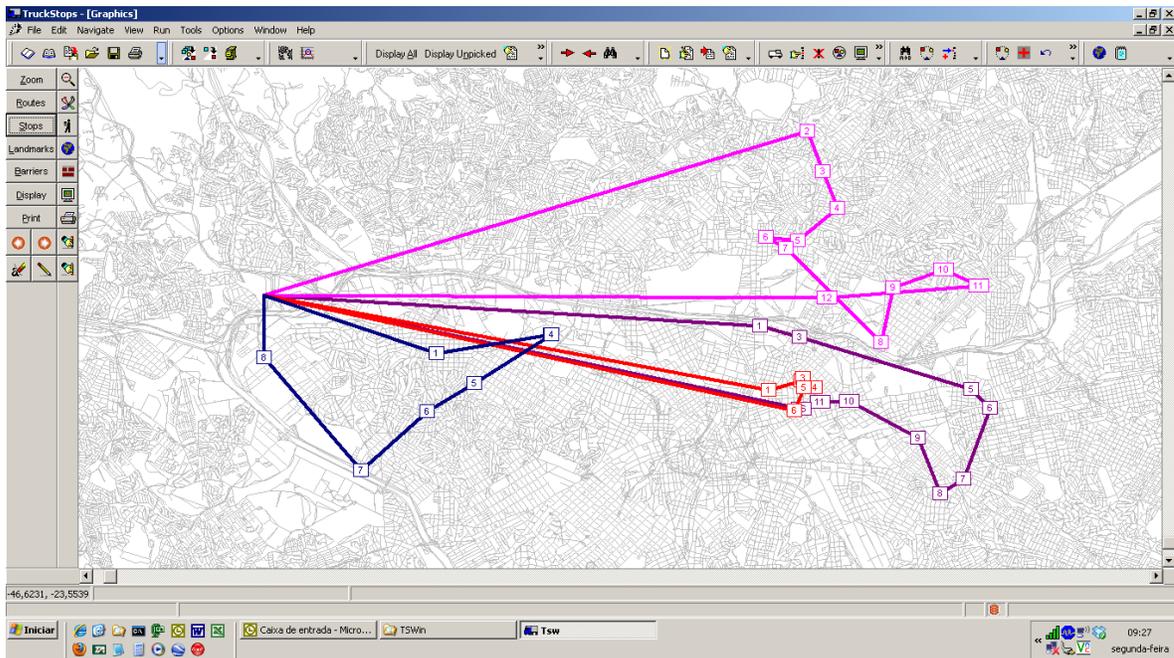


Figura 4.2: Sistema de Roteirização Truckstops® - Detalhamento de algumas rotas

Uma característica específica desta operação é que os veículos não possuem limitantes quanto ao horário de trabalho. Este limite fica imposto pelos próprios serviços, ou seja, o veículo não tem um horário estipulado para retornar à base sendo que seu horário de atendimento é limitado pelos horários de funcionamento dos serviços. Todos os veículos partem e retornam ao mesmo terminal.

O objetivo básico neste ponto é determinar os roteiros dos veículos que tenham o menor custo possível, através da redução de quilometragem rodada e quantidade de veículos utilizados, respeitando-se todos os limitantes impostos (janelas de tempo, capacidades, velocidade, restrições, etc.), o que está bem alinhado com o nível de dinamismo apresentado anteriormente, uma vez que neste estágio todas as informações são conhecidas e o problema é considerado estático.

A forma como o sistema de roteirização confecciona os roteiros do ponto de vista matemático é descrita em maiores detalhes no Apêndice A.

Uma vez determinado os itinerários dos veículos, estes são carregados e despachados do terminal nas primeiras horas da manhã. Todos os atendimentos são iniciados e finalizados no mesmo dia.

4.1.2 Veículos de Coleta

Apenas algumas coletas muito esporádicas são inseridas nos roteiros dos veículos de distribuição, existindo uma frota de veículos exclusivos para atendimento das coletas. Os itinerários destes veículos de coletas não são montados através de algum sistema de roteirização como é feito para os veículos de distribuição. Uma das razões mais importantes para esta característica é o próprio fato de existir um dinamismo nesta operação.

Tentativas de se utilizar um software roteirizador nesta operação de coleta estão nos planos da empresa, mas no momento em que esta pesquisa foi feita, os itinerários ainda eram montados manualmente. A frota de coleta é composta dos seguintes veículos:

Qte.	Modelo	Marca	Capacidade (kg)
3	MB 710	Mercedes Benz	3.120
8	MB 715 C	Mercedes Benz	2.840
2	MB 1718	Mercedes Benz	8.370
2	MB 1420	Mercedes Benz	13.920
1	HR HDBLWBSC	Hyundai	1.800
1	MB 180 D	Mercedes Benz	1.800
1	MB Sprinter	Mercedes Benz	1.800
1	Iveco Daily 35S14	Fiat	1.500

Figura 4.3: Composição da frota de coleta

4.2 Comunicação, Posicionamento e Informação sobre a execução dos Serviços

Todos os motoristas possuem um celular para comunicação com a central de despachos utilizados em casos de problemas, recusas de mercadorias, etc. Neste celular existe um sistema desenvolvido pela própria transportadora que permite que o motorista visualize os serviços que serão realizados e informe quais já foram realizados.

Além disto, todos os veículos da empresa que realizam serviços em São Paulo possuem sistema de rastreamento que envia sua posição atualizada a todo minuto para uma central de monitoramento. Tal sistema possui um teclado que permite interação (troca de mensagens) do motorista com a central de monitoramento. À medida que os serviços, tanto coletas quanto

entregas, são executados, os motoristas informam seu término à empresa através de um dos sistemas (celular ou rastreamento).

As informações de quais serviços já foram realizados ficam disponíveis no banco de dados da empresa e através de relatório disponível na sua intranet pode-se saber quais serviços ainda estão pendentes em cada um dos veículos.

Filial	MEC	Veículo	Motorista	Data/Hora Saída	Data/Hora Chegada	Peso (Kg)					
SAO	000004	999 (Empilhadeira com Rastreador)	XXXXXXXXXX	11/11/10 08:19:30		284.48					
Tp	Número documento	Destinatário	Cid	Dt/Hora Início	Dt/Hora Fim	Dt/Hora Baixa	Cód Baixa	Int Baixa	Início Carreg	Fim Carreg	Baixado Por
E			SAO	11/11/10 08:00	11/11/10 08:26	11/11/10 08:29	1.25	0h 3m			Filial
E			SAO	11/11/10 09:30	11/11/10 09:54	11/11/10 09:55		0h 1m			Rastreador
E			SAO	11/11/10 10:20	11/11/10 10:32	11/11/10 10:42		0h 10m			Rastreador
E			SAO	11/11/10 11:00	11/11/10 11:07	11/11/10 11:08		0h 1m			Rastreador
E			SAO	11/11/10 11:30	11/11/10 11:52	11/11/10 11:54		0h 2m			Rastreador
E			SAO	11/11/10 11:50	11/11/10 12:05	11/11/10 12:11	1.66	0h 6m			Filial
E			SAO	11/11/10 12:15	11/11/10 12:26	11/11/10 12:29		0h 3m			Rastreador
E			SAO	11/11/10 12:30	11/11/10 12:36	11/11/10 12:38		0h 2m			Rastreador
E			SAO	11/11/10 13:30	11/11/10 13:37	11/11/10 13:39		0h 2m			Rastreador
E			SAO	11/11/10 13:45	11/11/10 13:50	11/11/10 13:51		0h 1m			Rastreador
E			SAO	11/11/10 13:45	11/11/10 13:53	11/11/10 13:54		0h 1m			Rastreador
E			SAO	11/11/10 14:22	11/11/10 14:28	11/11/10 14:29		0h 1m			Rastreador
E			SAO	11/11/10 15:00	11/11/10 15:32	11/11/10 15:34		0h 2m			Rastreador
E			SAO	11/11/10 15:40	11/11/10 15:45	11/11/10 15:46		0h 1m			Rastreador
E			SAO	11/11/10 15:58	11/11/10 16:05	11/11/10 16:07		0h 2m			Rastreador
E			SAO	11/11/10 16:20	11/11/10 16:25	11/11/10 16:27		0h 2m			Rastreador
E			SAO								
E			SAO								
E			SAO								
E			SAO								
E			SAO								

Figura 4.4: Exemplo de relatório de veículo mostrando serviços já realizados e a realizar.

4.3 Central de Coleta

Após estes veículos saírem do seu terminal de carga rumo à execução dos serviços, novas solicitações de coletas surgem ao longo do dia, as quais precisam ser analisadas e atribuídas aos roteiros de forma a serem atendidas no mesmo dia da solicitação, o mais rápido possível e sem que sua inclusão nos roteiros interfira nos serviços já agendados a ponto de sua execução não ser mais possível.

Para cada nova solicitação realizada, as seguintes informações são pedidas pelo atendente:

- Nome da Empresa;
- Dados Cadastrais: Endereço, CNPJ, etc.;

- Pessoa de contato a ser procurada no momento da coleta;
- Horário de funcionamento (janela de tempo); e
- Quantidade de caixas e peso a ser coletado.

De posse destas informações, um funcionário analisa e programa sua inserção em um dos veículos disponíveis. A Figura 4.5 ilustra este processo.

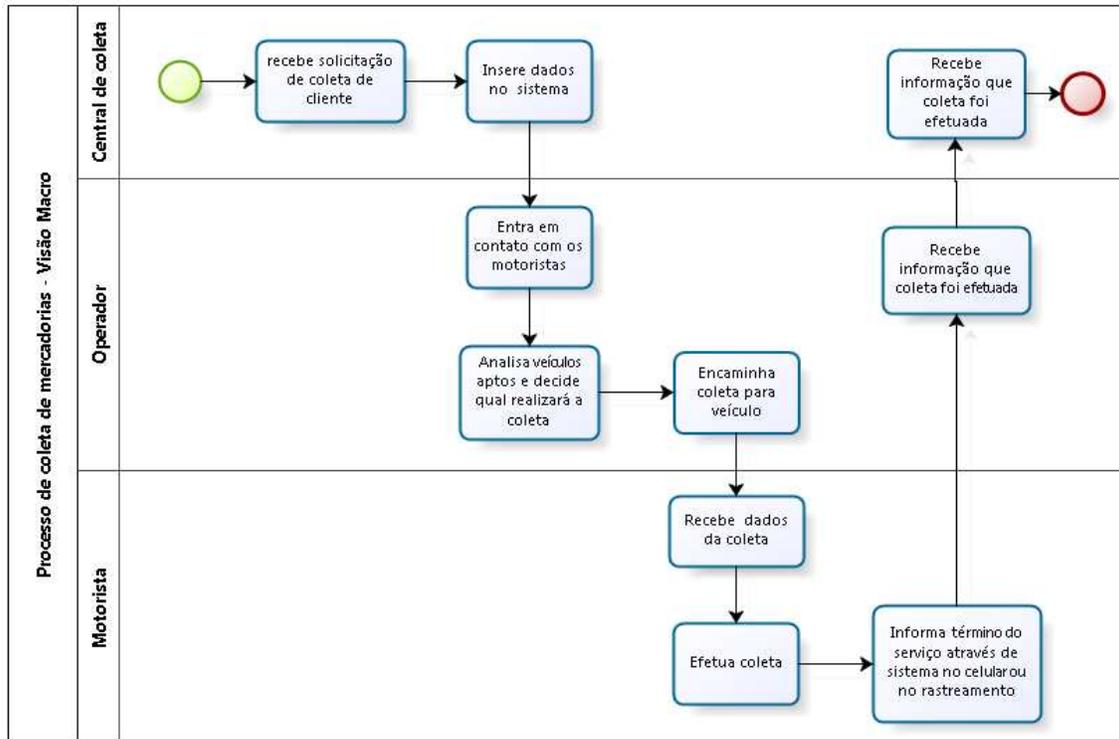


Figura 4.5: Visão macro do processo de coleta de mercadoria

Apesar dos veículos possuírem sistemas de rastreamento e seu posicionamento ser conhecido pela central de monitoramento, percebeu-se que pouco é usado pela central de coleta, preferindo-se fazer uso do celular onde em contato com os motoristas que estão na região da coleta, o operador decide em conjunto com eles se existe possibilidade de se realizar o serviço ou não.

Para que o posicionamento possa ser efetivamente utilizado, uma ferramenta está sendo desenvolvida para que as posições dos veículos sejam disponibilizadas em um mapa digital, para toda a empresa, facilitando seu uso, sua visualização e interpretação.

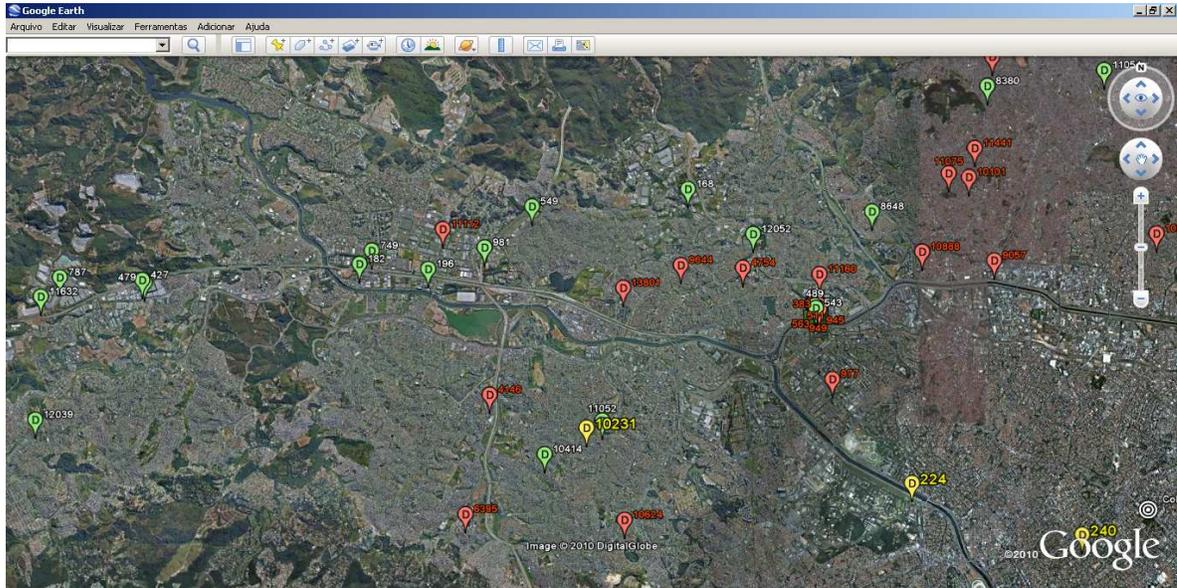


Figura 4.6: Integração entre mapa digital e posicionamento dos veículos da empresa de transporte

Uma vez decidido qual é o veículo que realizará a coleta, seus dados são transmitidos para o celular do motorista para que este possa efetuar o serviço e ao término informar sua realização. Ao final do dia, os veículos retornam ao mesmo terminal de onde partiram.

4.4 Aplicação da estratégia ao caso prático

4.4.1 Período de análise

Serão adotados para análise cinco dias de trabalho abrangendo uma semana de operação típica na empresa de transporte selecionada.

O período adotado foi de 29/11/2010 a 03/12/2010.

4.4.2 Características

Velocidade: igual a 20 km/h. Este valor foi baseado na experiência da empresa de transporte na distribuição e coleta de produtos na cidade de São Paulo.

Horário de Trabalho dos veículos: Como existe uma particularidade nesta operação onde os veículos possuem horário para sair mas não há horário obrigatório de retorno, foi adotado o horário inicial dos veículos como 07:30 h e o horário de término como sendo 23:59 h. Na prática o horário de atendimento do veículo fica limitado pelas janelas de horário dos clientes. Quando não for mais possível atender a nenhum cliente o veículo retorna ao seu terminal.

Quantidade de Veículos: Foram utilizados os mesmos veículos que foram utilizados na operação real da empresa nos dias selecionados. A saber:

Data	Quantidade	Tipos
29/11/10	8	3 Vans, 2 MB715, 2 MB710 e 1 MB1718
30/11/10	10	3 Vans, 3 MB715, 1 MB710, 2 Mb1718 e 1 MB1420
01/12/10	8	2 Vans, 3 MB715 e 3 MB710
02/12/10	10	3 Vans, 3 MB715, 2 MB710, 1 MB1718 e 1 MB1420
03/12/10	9	3 Vans, 2 MB715, 2 MB710, 1 MB1718 e 1 MB1420

Figura 4.7: Quantidade de veículos por dia

Janela de atendimento: cada serviço possui uma janela de atendimento que foi fornecida pela empresa transportadora baseada em seu cadastro de clientes. Os detalhes de cada um dos pontos atendidos encontram-se no Apêndice D.

Quantidade de serviços: A quantidade de coletas em cada dia de estudo, bem como o percentual de coletas dinâmicas, está demonstrada na Figura 4.8.

Dia	Qte. Coletas Não Dinâmicas	Qte. Coletas Dinâmicas	% Coletas Dinâmicas
29/11/10	50	4	8%
30/11/10	46	4	9%
01/12/10	40	5	13%
02/12/10	53	2	4%
03/12/10	47	4	9%
Total:	236	19	8%

Figura 4.8: Quantidade de coletas

4.5 Cenários de Simulação

Foram adotados três cenários de simulação na etapa de roteirização estática para análises comparativas dos dados:

- Cenário 1: foram mantidos os roteiros originais construídos manualmente pela empresa.
- Cenário 2: os roteiros iniciais foram construídos através da heurística *II* com os parâmetros λ , μ , α_1 e α_2 respectivamente iguais a 2, 1, 0 e 1, privilegiando a redução no tempo de atendimento ($\alpha_1 = 0$).
- Cenário 3: os roteiros iniciais foram construídos através da heurística *II* com os parâmetros λ , μ , α_1 e α_2 respectivamente iguais a 2, 1, 1 e 0, privilegiando a redução na distância percorrida ($\alpha_1 = 1$).

Em todos os cenários, após a etapa inicial de construção dos roteiros, foram aplicadas as etapas de designação dinâmica e roteirização dinâmica.

5 Análises Comparativas

O objetivo deste capítulo é analisar os dados coletados nas simulações efetuadas nos diferentes cenários propostos e compará-los com o que a empresa realiza na prática.

5.1 Tempo de Processamento

A Tabela 5.1 exibe o tempo total de resposta do sistema, que é o tempo necessário para se processar a construção dos roteiros iniciais, a designação dinâmica e a roteirização dinâmica, nos três cenários propostos. Os tempos estão expressos em segundos.

Dia	Quantidade de Coletas		Construção inicial dos roteiros		
	Não Dinâmicas	Dinâmicas	Cenário 1 Manual	Heurística II	
				Cenário 2 $\alpha_I = 0$	Cenário 3 $\alpha_I = 1$
29/11/10	50	4	0,01566	0,17166	0,16798
30/11/10	46	4	0,01597	0,10965	0,10965
01/12/10	40	5	0,01566	0,10932	0,11466
02/12/10	53	2	0,01533	0,13565	0,13533
03/12/10	47	4	0,01567	0,11499	0,11999

Tabela 5.1: Tempos de Processamento

Para obtenção dos tempos de processamento foram feitas três medições para cada um dos três cenários e em cada um dos cinco dias, sendo posteriormente calculado o tempo médio. Como se pode observar, em todos os casos o tempo de processamento foi extremamente pequeno ficando abaixo dos 200 milissegundos.

No caso do cenário 1 onde os roteiros originais são mantidos, por não ter o processamento das rotinas de construção dos roteiros na heurística II, o tempo se reduz ainda mais ficando em torno dos 15 milissegundos.

No sentido de testar o modelo em situações de grande volume de dados, foram realizadas medidas considerando-se mais pontos de atendimento bem como uma quantidade de veículos suficiente para atendê-los. Estes tempos encontram-se na Tabela 5.2.

Qte. Coletas		Construção Roteiro (*)	Designação Dinâmica (*)
Não Dinâmicas	Dinâmicas		
1000	5	199,76	0,016
1000	100	199,73	1,07
1000	500	199,75	9,97

(*) tempos expressos em segundos

Tabela 5.2: Tempos de Processamento

5.2 Distância Percorrida

Apesar do impacto na distância percorrida não ser foco principal deste trabalho, é válido analisar quais os efeitos gerados neste quesito. A Tabela 5.3 e o Gráfico 5.4 mostram a distância percorrida pelos veículos quando os roteiros foram feitos manualmente, bem como as designações das coletas dinâmicas ao longo do dia.

Pode-se verificar que existe um aumento da distância percorrida, o que era esperado uma vez que mais serviços são adicionados aos veículos, de aproximadamente 5,6 % totalizando-se os cinco dias de análise.

Dia	Antes da Designação		Após a Designação		%	Qte. Coletas Dinâmicas	Qte. Coletas Não Dinâmicas	%
	Distância Percorrida (km)	Qte. De Veículos	Distância Percorrida (km)	Qte. De Veículos				
29/11/10	483,66	8	499,11	8	3,2%	4	50	8%
30/11/10	511,83	10	548,57	10	7,2%	4	46	9%
01/12/10	463,97	7	497,76	7	7,3%	5	40	13%
02/12/10	614,95	10	641,09	10	4,3%	2	53	4%
03/12/10	514,48	9	547,74	9	6,5%	4	47	9%
Total:	2588,89	44	2734,26	44	5,6%	19	236	8%

Tabela 5.3: Distância Percorrida – Criação dos roteiros e designação manuais

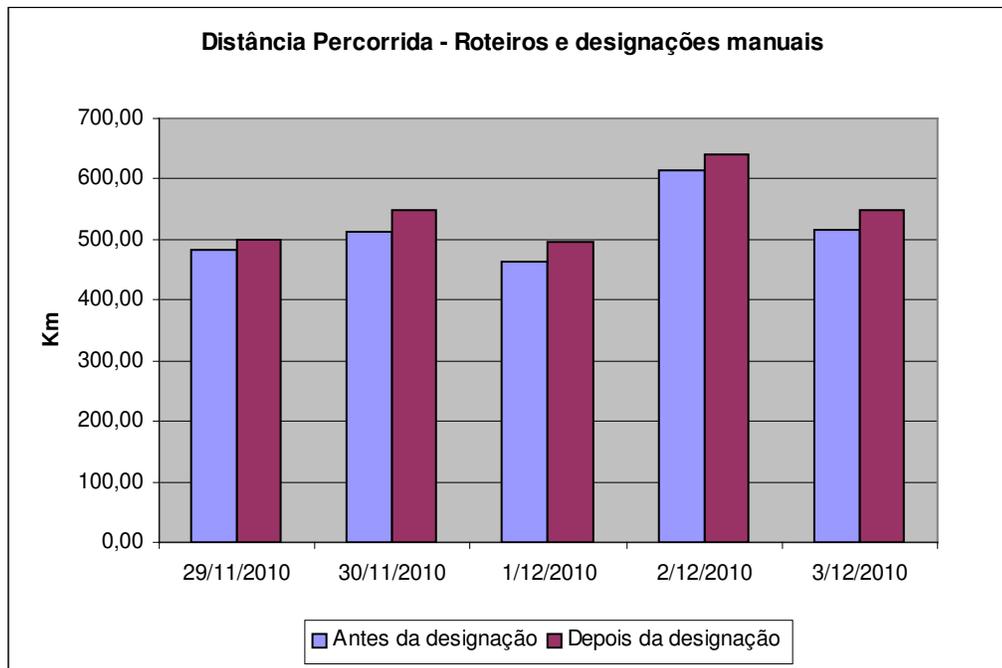


Gráfico 5.4: Distância Percorrida – Criação dos roteiros e designação manuais

5.2.1 Cenário 1

Já a Tabela 5.5 e o Gráfico 5.6 mostram os dados obtidos mantendo-se os roteiros originais feitos manualmente e executando a designação otimizada e roteirização dinâmica através das heurísticas adotadas.

Dia	Antes da Designação		Após a Designação		%	Qte. Coletas Dinâmicas	Qte. Coletas Não Dinâmicas	%
	Distância Percorrida (km)	Qte. De Veículos	Distância Percorrida (km)	Qte. de Veículos				
29/11/10	483,66	8	521,95	8	7,9%	4	50	8%
30/11/10	511,83	10	599,83	10	17,2%	4	46	9%
01/12/10	463,97	7	492,56	7	6,2%	5	40	13%
02/12/10	614,95	10	660,73	10	7,4%	2	53	4%
03/12/10	514,48	9	546,97	9	6,3%	4	47	9%
Total:	2588,89	44	2822,04	44	9,0%	19	236	8%

Tabela 5.5: Distância Percorrida – Cenário 1

Da mesma forma percebe-se um aumento na distância percorrida total de 9,0 % após a designação otimizada ser realizada. Quando comparada com o aumento realizado pela designação manual verifica-se que a diferença é de 87,78 Km, totalizando-se os cinco dias de análise, ou seja, um aumento de 3,21 %.

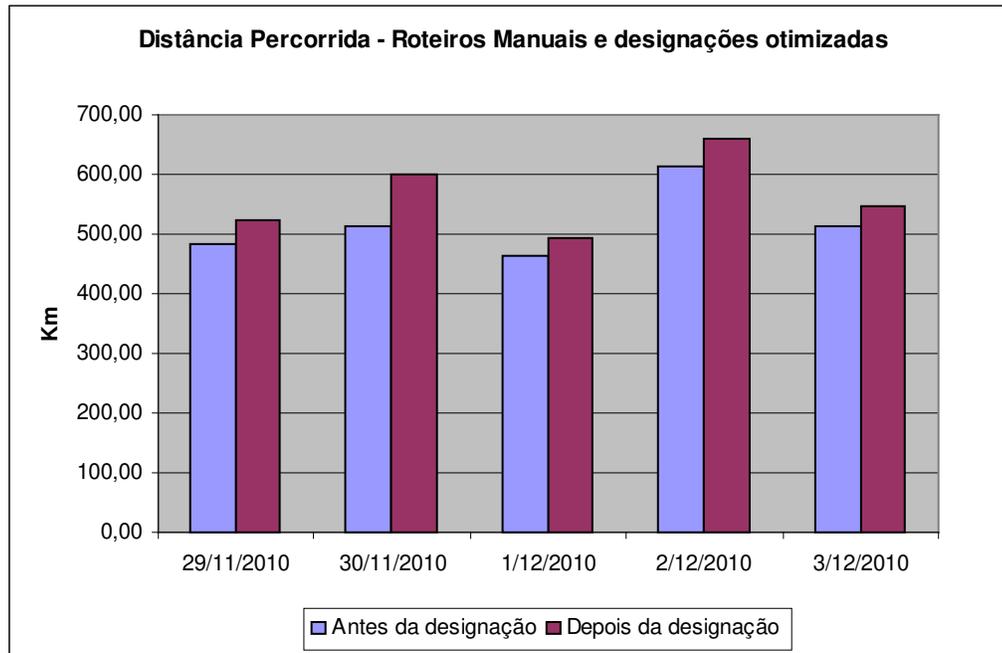


Gráfico 5.6: Distância Percorrida – Cenário 1

5.2.2 Cenário 2

A Tabela 5.7 e o Gráfico 5.8 resumem os dados obtidos.

Dia	Antes da Designação		Após a Designação		%	Qte. Coletas Dinâmicas	Qte. Coletas Não Dinâmicas	%
	Distância Percorrida (km)	Qte. De Veículos	Distância Percorrida (km)	Qte. De Veículos				
29/11/10	418,33	8	453,95	8	8,5%	4	50	8%
30/11/10	437,18	9	521,48	9	19,3%	4	46	9%
01/12/10	394,32	7	435,57	7	10,5%	5	40	13%
02/12/10	432,30	9	489,97	9	13,3%	2	53	4%
03/12/10	474,83	9	537,54	9	13,2%	4	47	9%
Total:	2156,96	42	2438,51	42	13,1%	19	236	8%

Tabela 5.7: Distância Percorrida – Cenário 2

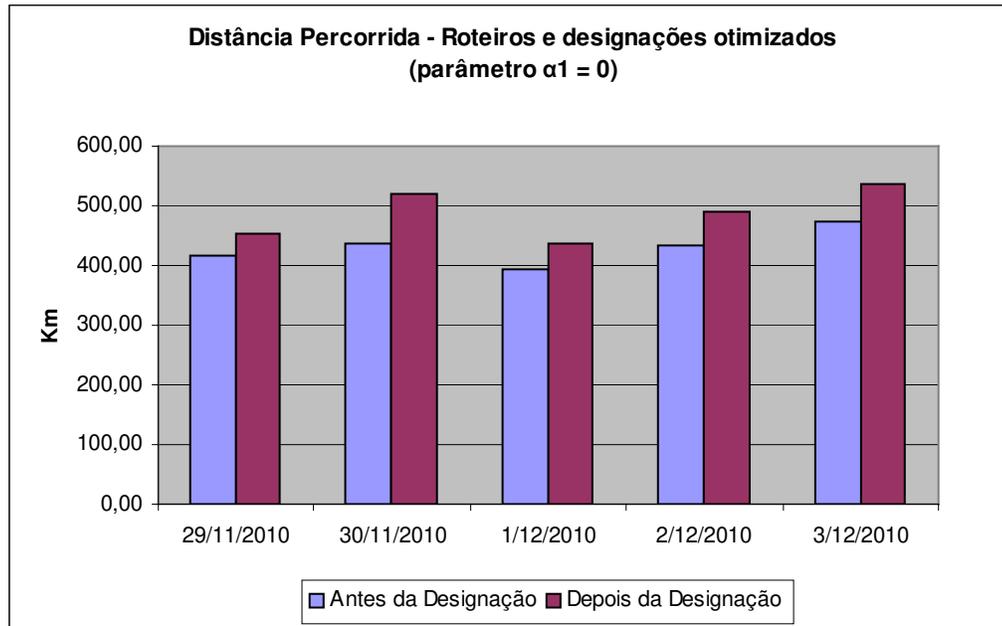


Gráfico 5.8: Distância Percorrida – Cenário 2

Apesar do aumento efetivo na distância percorrida após a designação otimizada ter sido de 13,1 %, e maior que no cenário 1, que foi de 9,0 %, a distância total percorrida pelos veículos foi reduzida em 16,68 % nos roteiros iniciais e em 10,81 % nos roteiros após a designação dinâmica.

A quantidade de veículos usados para atendimentos dos serviços foi reduzida de 44 para 42 veículos no total, ou seja, em 4,54 %.

5.2.3 Cenário 3

A Tabela 5.9 e o Gráfico 5.10 resumem os dados obtidos.

Dia	Antes da Designação		Após a Designação		%	Qte. Coletas Dinâmicas	Qte. Coletas Não Dinâmicas	%
	Distância Percorrida (km)	Qte. De Veículos	Distância Percorrida (km)	Qte. De Veículos				
29/11/10	425,31	8	460,93	8	8,4%	4	50	8%
30/11/10	463,15	10	547,45	10	18,2%	4	46	9%
01/12/10	371,10	7	419,13	7	12,9%	5	40	13%
02/12/10	431,91	9	473,96	9	9,7%	2	53	4%
03/12/10	453,13	9	491,82	9	8,5%	4	47	9%
Total:	2144,60	43	2393,29	43	11,6%	19	236	8%

Tabela 5.9: Distância Percorrida – Cenário 3

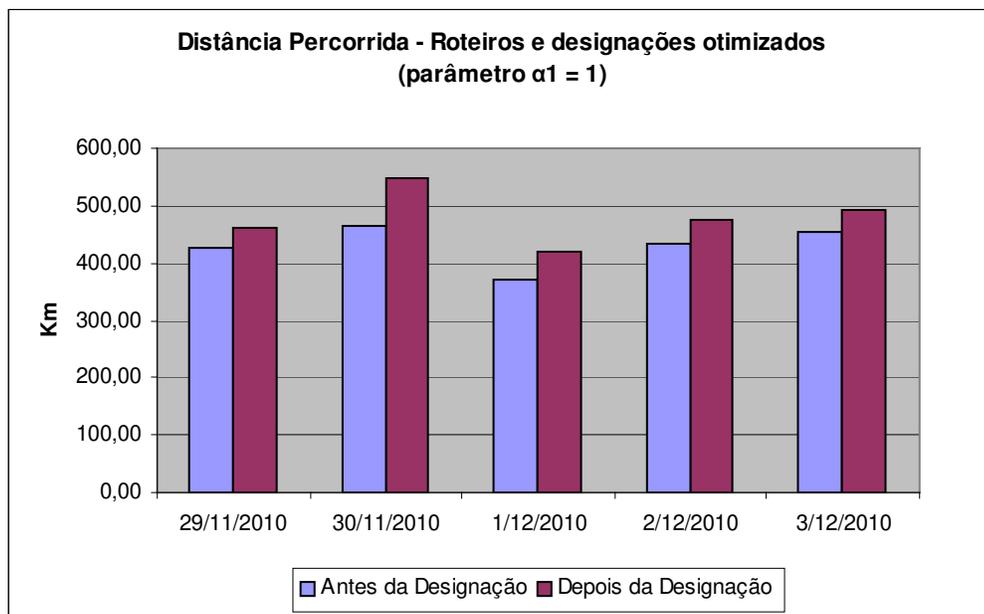


Gráfico 5.10: Distância Percorrida – Cenário 3

Comparando-se as distâncias percorridas no cenário 3 em relação aos roteiros e designações manuais, percebe-se uma redução de 17,16 % nos roteiros iniciais e de 12,47 % nos roteiros após o processamento das designações dinâmicas. Além disto, a quantidade de veículos total utilizada foi de 43 contra 44, uma redução de 2,27 %.

Em relação ao cenário 2, também existe uma redução na distância percorrida: de 0,57 % nos roteiros iniciais e de 1,85 % nos roteiros pós-designação. Mas houve um aumento na quantidade de veículo: de 42 para 43, ou seja, de 2,38 %.

5.3 Tempo de Atendimento

5.3.1 Cenário 1

Comparando-se os tempos de atendimento realizados na prática no universo estudado, percebe-se que houve uma redução de 3782 minutos para 1191 minutos, ou seja, uma redução de 68,51 % no tempo total de atendimento gasto pelos veículos.

A redução média no tempo de atendimento foi de 136,37 minutos ou 02:16 h. A Tabela 5.11 registra em detalhes os tempos de atendimento de cada solicitação para este cenário.

Dia	ID	Horário da Solicitação	Atendimento Real			Atendimento Simulado			Redução Tempo (*)	% Redução
			Início	Final	Tempo (*)	Início	Final	Tempo (*)		
29/11/10	144	08:56	16:00	16:10	424	09:21	09:31	25	399	94,10%
	161	11:12	13:10	14:15	118	11:45	12:50	33	85	72,03%
	163	10:47	16:00	16:25	313	10:51	11:16	4	309	98,72%
	159	10:21	12:10	13:00	109	14:08	14:12	227	-118	-108,26%
30/11/10	257	10:38	13:11	14:00	153	10:55	11:44	17	136	88,89%
	202	10:53	14:38	15:11	225	12:03	12:37	70	155	68,89%
	250	11:02	14:38	15:00	216	12:06	12:27	64	152	70,37%
	279	12:36	15:43	17:00	187	13:19	14:36	43	144	77,01%
01/12/10	320	10:27	12:05	13:34	98	10:47	12:16	20	78	79,59%
	292	10:10	14:45	14:50	275	15:12	15:17	302	-27	-9,82%
	300	11:20	15:10	15:35	230	11:55	12:20	35	195	84,78%
	319	11:31	12:20	12:35	49	12:19	12:34	48	1	2,04%
	335	15:45	16:59	20:02	74	17:58	21:01	133	-59	-79,73%
02/12/10	347	09:20	12:04	12:20	164	09:26	09:41	6	158	96,34%
	367	10:34	13:06	13:40	152	11:17	11:51	43	109	71,71%
03/12/10	462	10:43	17:00	17:25	377	11:00	11:25	17	360	95,49%
	471	10:28	14:20	14:40	232	11:57	12:17	89	143	61,64%
	456	10:19	15:30	17:05	311	10:23	11:58	4	307	98,71%
	481	11:57	13:12	13:23	75	12:08	12:19	11	64	85,33%

Total:	3782
--------	------

1191	2591	68,51%
------	------	--------

(*) tempo de atendimento em minutos

Tabela 5.11: Tempo de Atendimento – Cenário 1

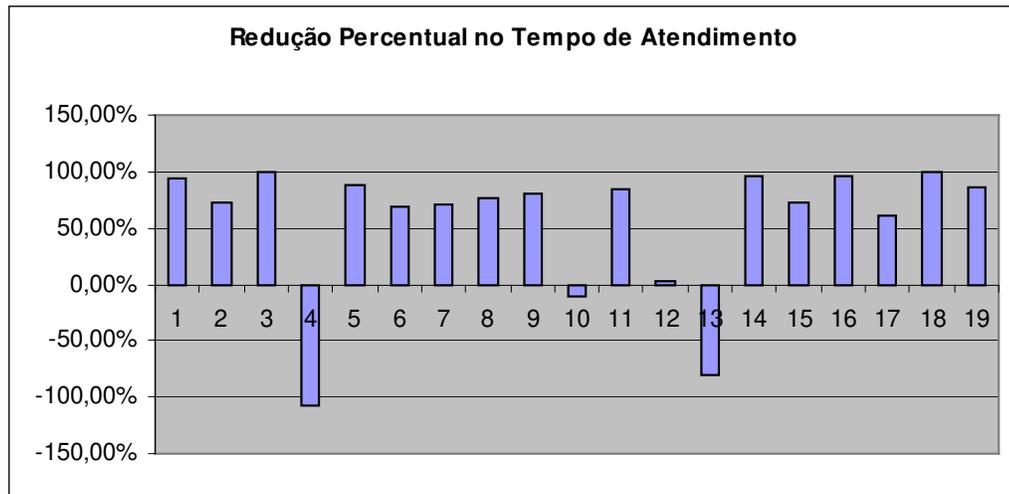


Gráfico 5.12: Redução no Tempo de Atendimento – Cenário 1

Dos 19 pontos analisados, apenas 3 não tiveram reduções em seus tempos de atendimento. Em especial o item cujo *ID* é igual a 159 vale ser ressaltado, pois se trata de uma coleta dinâmica onde, no momento de sua solicitação, já existia uma outra coleta prevista (não dinâmica) neste cliente programada em um roteiro. Neste caso foi decidido pela estratégia estabelecida designá-la a este roteiro mesmo em detrimento ao tempo de atendimento.

5.3.2 Cenário 2

No cenário 2 observa-se também uma redução significativa nos tempos de atendimento muito semelhante ao cenário 1:

- redução de 3782 para 1190, ou seja, 68,54 % de redução no tempo total de atendimento;
- redução média de 136,42 minutos (2:16 h); e
- apenas em 2 solicitações dinâmicas não são encontradas reduções no tempo de atendimento.

Os detalhes são exibidos na Tabela 5.13 e no Gráfico 5.14 a seguir.

Dia	ID	Horário da Solicitação	Atendimento Real			Atendimento Simulado			Redução Tempo (*)	% Redução
			Início	Final	Tempo (*)	Início	Final	Tempo (*)		
29/11/10	144	08:56	16:00	16:10	424	09:06	09:16	10	414	97,64%
	161	11:12	13:10	14:15	118	11:33	12:38	21	97	82,20%
	163	10:47	16:00	16:25	313	11:06	11:31	19	294	93,93%
	159	10:21	12:10	13:00	109	10:39	11:29	18	91	83,49%
30/11/10	257	10:38	13:11	14:00	153	15:10	15:59	272	-119	-77,78%
	202	10:53	14:38	15:11	225	12:48	13:22	115	110	48,89%
	250	11:02	14:38	15:00	216	11:25	11:46	23	193	89,35%
	279	12:36	15:43	17:00	187	12:59	14:16	23	164	87,70%
01/12/10	320	10:27	12:05	13:34	98	12:16	13:45	109	-11	-11,22%
	292	10:10	14:45	14:50	275	14:36	14:41	266	9	3,27%
	300	11:20	15:10	15:35	230	12:15	12:40	55	175	76,09%
	319	11:31	12:20	12:35	49	11:44	11:59	13	36	73,47%
	335	15:45	16:59	20:02	74	16:03	19:06	18	56	75,68%
02/12/10	347	09:20	12:04	12:20	164	09:54	10:09	34	130	79,27%
	367	10:34	13:06	13:40	152	11:17	11:51	43	109	71,71%
03/12/10	462	10:43	17:00	17:25	377	11:47	12:12	64	313	83,02%
	471	10:28	14:20	14:40	232	10:33	10:53	5	227	97,84%
	456	10:19	15:30	17:05	311	11:24	12:59	65	246	79,10%
	481	11:57	13:12	13:23	75	12:14	12:25	17	58	77,33%

Total:	3782
--------	------

1190	2592	68,54%
------	------	--------

(*) tempo de atendimento em minutos

Tabela 5.13: Tempo de Atendimento – Cenário 2

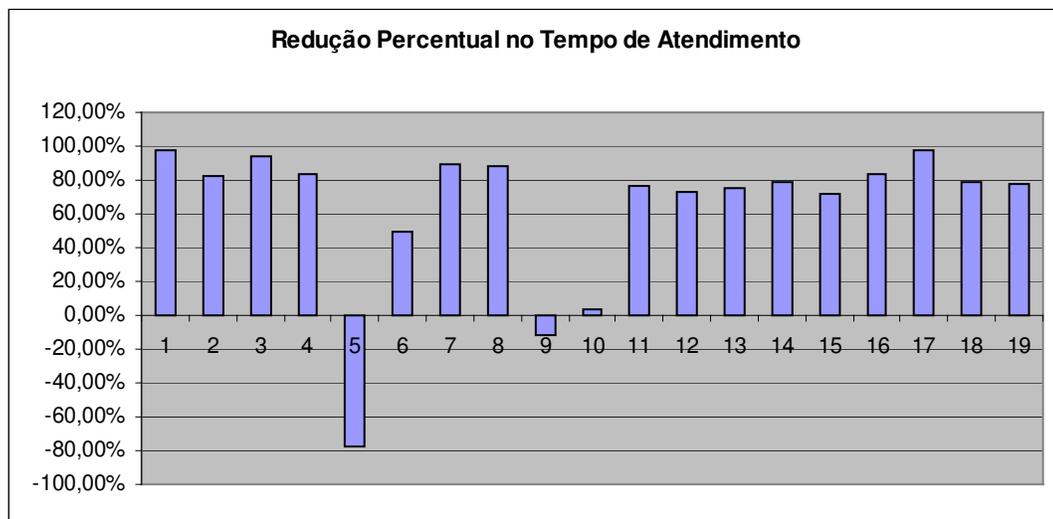


Gráfico 5.14: Redução no Tempo de Atendimento – Cenário 2

5.3.3 Cenário 3

Da mesma forma, no cenário 3 observa-se forte redução nos tempos de atendimento, semelhante aos cenários 1 e 2.

A redução no tempo total de atendimento foi de 66 %, de 3782 minutos gastos na prática foi possível reduzir para 1286 minutos. A média de redução nas solicitações foi de 131,37 minutos, ou seja, 2 horas e 11 minutos.

Dia	ID	Horário da Solicitação	Atendimento Real			Atendimento Simulado			Redução Tempo (*)	% Redução
			Início	Final	Tempo (*)	Início	Final	Tempo (*)		
29/11/10	144	08:56	16:00	16:10	424	09:06	09:16	10	414	97,64%
	161	11:12	13:10	14:15	118	11:33	12:38	21	97	82,20%
	163	10:47	16:00	16:25	313	11:06	11:31	19	294	93,93%
	159	10:21	12:10	13:00	109	10:39	11:29	18	91	83,49%
30/11/10	257	10:38	13:11	14:00	153	15:10	15:59	272	-119	-77,78%
	202	10:53	14:38	15:11	225	12:48	13:22	115	110	48,89%
	250	11:02	14:38	15:00	216	11:25	11:46	23	193	89,35%
	279	12:36	15:43	17:00	187	12:59	14:16	23	164	87,70%
01/12/10	320	10:27	12:05	13:34	98	12:16	13:45	109	-11	-11,22%
	292	10:10	14:45	14:50	275	14:36	14:41	266	9	3,27%
	300	11:20	15:10	15:35	230	12:15	12:40	55	175	76,09%
	319	11:31	12:20	12:35	49	11:44	11:59	13	36	73,47%
	335	15:45	16:59	20:02	74	16:50	19:53	65	9	12,16%
02/12/10	347	09:20	12:04	12:20	164	09:54	10:09	34	130	79,27%
	367	10:34	13:06	13:40	152	10:54	11:28	20	132	86,84%
03/12/10	462	10:43	17:00	17:25	377	11:30	11:55	47	330	87,53%
	471	10:28	14:20	14:40	232	10:38	10:58	10	222	95,69%
	456	10:19	15:30	17:05	311	12:48	14:23	149	162	52,09%
	481	11:57	13:12	13:23	75	12:14	12:25	17	58	77,33%

Total:	3782
--------	------

1286	2496	66,00%
------	------	--------

(*) tempo de atendimento em minutos

Tabela 5.15: Tempo de Atendimento – Cenário 3

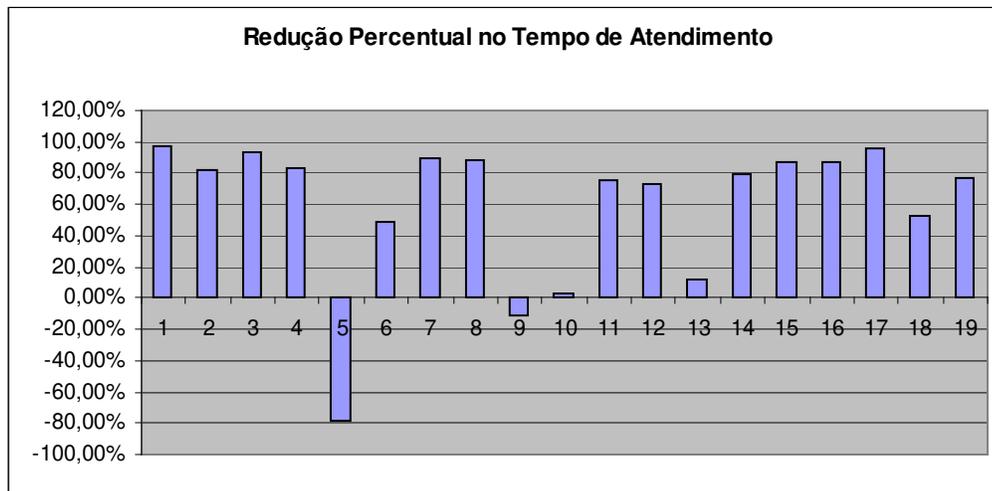


Gráfico 5.16: Redução no Tempo de Atendimento – Cenário 3

5.4 Resultados

O modelo proposto não apresenta impacto que possa ser causado pelo tempo de processamento, ou seja, devido ao tempo bastante reduzido de processamento pode ser aplicado a uma operação real. Mesmo quando se extrapolou a quantidade de pontos a serem atendidos, o tempo de processamento continuou muito baixo, valendo ainda ressaltar que a quantidade de pontos utilizada nos testes é muito maior do que as encontradas nas diversas operações diárias das empresas de transporte.

Em relação à distância percorrida, o uso da heurística *II* para construção dos roteiros teve grande impacto nos roteiros iniciais e, conseqüentemente, depois da designação também, pois nos roteiros originais (manuais) a distância percorrida foi reduzida de aproximadamente 2.588 km para 2.144 km, ou seja, são 444 km de diferença em 5 dias de análise. Da mesma forma depois da designação das coletas dinâmicas, a redução foi de 2.734 km para 2.393 km, uma diferença de 341 km.

Extrapolando-se e imaginando-se que esta redução se mantenha de forma homogênea durante todas as semanas, em um ano existe um potencial de redução de quilômetros rodados de aproximadamente 22.200 km, considerando-se 50 semanas de trabalho no ano. Isto reforça que a

aplicação de uma heurística à operação manual, neste caso a *II*, é bastante recomendada pelos resultados gerados.

A redução obtida na distância percorrida quando o parâmetro α_I é igual a 1 (cenário 3) evidencia o foco na redução da distância como foi proposto na heurística *II* realizada por Solomon (1987) e gera reflexos na distância total percorrida após a designação ser realizada.

Em relação ao tempo de atendimento, percebe-se uma redução grande no tempo de atendimento das coletas dinâmicas: de um total de 3.782 minutos para 1.191 minutos (mantendo os roteiros originais), para 1.190 minutos ($\alpha_I = 0$) e para 1286 minutos ($\alpha_I = 1$).

Isto mostra que com $\alpha_I = 0$, que evidencia redução no tempo de atendimento conforme proposto por Solomon (1987), existe realmente um impacto maior no tempo de atendimento das coletas dinâmicas. Foram 2.592 minutos reduzidos com $\alpha_I = 0$ contra 2.496 minutos com $\alpha_I = 1$.

Apesar da quantidade de coletas dinâmicas representar em torno de 8% dos serviços diários, o método proposto resultou em grande redução percentual de 68,54 % no tempo de atendimento. Em situações onde esta quantidade seja maior, existe a possibilidade de maiores economias serem encontradas, uma vez que é extremamente difícil gerenciar manualmente uma grande quantidade de pedidos dinâmicos.

Estas reduções e melhorias são verificadas em qualquer um dos cenários estabelecidos, o que mostra que a aplicação destas heurísticas gera fortes impactos positivos na operação estudada, sendo, portanto, altamente recomendadas.

6 Considerações finais

6.1 Conclusão

Raras são as aplicações práticas de distribuição de mercadorias no dia a dia das empresas onde não existam aspectos dinâmicos. Apesar deste fato e de que o problema de roteirização dinâmica de veículos ser conhecido e estudado há muitos anos pela comunidade acadêmica, apenas nos últimos anos houve um crescimento no interesse por abordagens para uma solução satisfatória. A razão para tal vem do fato de que nos últimos anos, com a constante redução em seus custos, as tecnologias de comunicação, sejam de rádio ou celular e de rastreamento de veículos, se tornaram acessíveis a todas as empresas permitindo que as soluções obtidas pudessem ser realizadas na prática.

Focado na melhoria do gerenciamento de frota, o objetivo deste trabalho foi de obter uma estratégia de abordagem com o objetivo de reduzir o tempo de atendimento das coletas dinâmicas, aplicando-a a um caso real de uma empresa de transporte de carga.

A solução adotada foi constituída da aplicação da heurística *II* na construção dos itinerários dos veículos, da heurística do vizinho mais próximo orientado ao tempo na designação das coletas dinâmicas aos roteiros e da heurística *2-opt* no melhoramento dos itinerários após inserção de novas coletas. Algumas adaptações foram necessárias durante os estudos para melhor aplicabilidade das soluções obtidas, como a adoção de limitantes de horário máximo de atendimento na construção dos roteiros iniciais, a setorização da região de atendimento e o tratamento de casos especiais de algumas coletas dinâmicas.

Finalmente, após aplicado o modelo, pode-se perceber que a solução adotada forneceu resultados muito bons quanto à redução no tempo de atendimento das coletas dinâmicas e com tempo de processamento extremamente rápido que não geraria impacto na operação na vida real.

O fato do caso estudado não ter, no dia a dia de suas operações, seus itinerários construídos através de alguma heurística, sendo feitos manualmente, contribuiu para que houvesse uma

significativa redução na distância percorrida, o que enfatiza ainda mais a importância da aplicação de heurísticas de otimização nas empresas de distribuição e coleta de mercadorias.

6.2 Sugestões para futuras pesquisas

A seguir são relacionadas algumas sugestões para melhoria do modelo proposto:

- Implementar a versão paralela da heurística *II* e comparar os resultados com o modelo tradicional (sequencial).
- Seguindo os estudos de Bräysy *et al.*(2005), modificar e implementar o método 2-opt com o objetivo de reduzir o tempo de processamento evitando-se a inversão do sentido do roteiro.
- Adicionar outras restrições na montagem dos roteiros, como por exemplo: limites de valores permitidos de carregamento, restrições de circulação de veículos em áreas não permitidas e rodízio de veículos praticado na cidade de São Paulo, áreas com horários de entrega impostos por prefeituras, etc.
- Rever o modelo considerando que o tempo de espera, que ocorre quando um veículo chega no cliente antes do início da janela de atendimento, possui custo.
- Alterar a setorização, que neste caso foi estabelecida por critérios geográficos, para que leve em consideração a concentração dos clientes.
- Na fase de montagem dos roteiros considerar que apenas uma porcentagem da capacidade total de carregamento dos veículos está disponível e comparar os resultados com os atualmente apresentados onde foi imposta uma limitação arbitrária de horário.

- Alterar a forma de seleção do ponto a ser inserido no roteiro em construção avaliando-se primeiramente se sua inserção tornará o roteiro ineficaz antes de partir para os cálculos dos critérios da heurística *II* e analisar qual o impacto no tempo de processamento.
- Alterar o modelo para que leve em conta as declividades dos logradouros percorridos no custo de deslocamento entre os serviços.

Bibliografia

- Ahmmed, Ashek (Rajshahi University of Engineering and Technology); Rana, Md. Ali Ahsan; Haque, Abul Ahsan Md. Mahmudul; Mamun, Md. Al Source: Proceedings - 3rd International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology, ICCIT 2008, v 2, p 182-187, 2008, Proceedings - 3rd International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology, ICCIT 2008).
- Barr, R. S., Golden B., Kelly J., Resende M. and Stewart W, “Designing and Reporting on Computational Experiments with Heuristic Methods”, Journal of Heuristics 1, 9–32, 1995.
- Cordeau, J., Gendreau M., Laporte G., Potvin J. and Semet F., “A Guide to Vehicle Routing Heuristics”, Journal of the Operational Research Society 53, 512–522, 2002.
- Cordeau J., Desaulniers G., Desrosiers J., Solomon M., Soumis F., “VRP with time windows”. In: Toth P, Vigo D, editors. The vehicle routing problem. SIAM monographs on discrete mathematics and applications, vol. 9. Philadelphia, PA, p. 157–93, 2002b
- Belfiore P., “Scatter Search para problemas de roteirização de veículos com frota heterogênea, janelas de tempo e entregas fracionadas”, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP – 2006.
- Berbeglia G. *et al.*, “Dynamic pickup and delivery problems” European Journal of Operational Research, Volume 202, Issue 1, Pages 8-15, 2010.
- Bramel J., Simchi-Levi D., “Probabilistic Analyses and Practical Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Time Windows.”, Operations Research 44, 501–509, 1996.
- Brandão J., "A tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem", Computers & Operations Research 38, 140–151, 2011.
- Brandão J. “A deterministic tabu search algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem”. European Journal of Operational Research;195:716–28, 2009.

- Brandão J., Mercer A., “A tabu search algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem”. *European Journal of Operational Research*;100:180–91, 1997.
- Bräysy O., “Genetic Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Time Windows”, *Special issue on Bioinformatics and Genetic Algorithms*, 2001.
- Bräysy O., M. Gendreau. “Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms”. *Transportation Sci.* 39(1) 104–118, 2005a.
- Bräysy O., Gendreau M., “Vehicle routing problem with time windows, Part II: Metaheuristics”. *Transportation Sci.* 39(1) 119–139, 2005b.
- Bräysy O., “Fast local searches for the vehicle routing problem with time windows”. *Inform. Systems Oper. Res.* 40 319–330, 2002a.
- Bräysy O., Hasle G., Dullaert W., “A multi-start local search algorithm for the vehicle routing problem with time windows”, *European Journal of Operational Research* 159 586–605, 2004a.
- Bräysy O., Dullaert W., “A fast evolutionary metaheuristic for the vehicle routing problem with time windows”. *International Journal on Artificial Intelligence Tools* 12, 153–172, 2003.
- Bräysy O., Dullaert W., Gendreau M., “Evolutionary Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Time Windows”, *Journal of Heuristics*, 10: 587–611, 2004b.
- Bräysy O., Gendreau M., “Tabu Search Heuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows”, *Sociedad de Estadística e Investigación Operativa Top* Vol. 10, No. 2, pp. 211-237, 2002b.
- Chabrier A., “Vehicle routing problem with elementary shortest path based column generation”, *Computers & Operations Research*; 33(10):2972–90, 2006.

- Créput J., Hajjam A., Koukam A., Kuhn O., "Self-organizing maps in population based metaheuristic to the dynamic vehicle routing problem", *Journal of Combinatorial Optimization* DOI: 10.1007/s10878-011-9400-8, 2011.

- Cunha, Cláudio Barbieri, "Uma contribuição para o para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais". Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.

- Cunha, Cláudio Barbieri, "Experimentos computacionais com heurísticas de melhorias para o problema do caixeiro viajante", Trabalho apresentado no XVI Congresso da Anpet – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes e publicado nos anais do evento. 2002.

- Dantzig G., Ramser J., "The truck dispatching problem", *Management Science*, vol. 10, no. 6, pp. 80-91, 1959.

- Dedong W., Qijun C., Lili, "Stochastic vehicle routing problems and their solution algorithm", *Automation and Logistics*, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference pp.958-962, 1-3 Sept. 2008.

- Dullaert W., Bräysy O., "Routing Relatively Few Customers per Route." *TOP* 11, 325–336, 2003.

- Dullaert W., Janssens G. , Sorensen K., Vermimmen B., "New heuristics for the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows", *Journal of Operational Research Society*, v. 53, p. 1232-1238, 2002.

- Dumas Y., Desrosiers J., Soumis F., "The pickup and delivery problem with time windows," *European Journal of Operational Research*, Vol. 54, no. 1, pp 7-22, 1991.

- Gehring H., Homberger J., "Parallelization of a Two-Phase Metaheuristic for Routing Problems with Time Windows", *Journal of Heuristics*, 8: 251–276, 2002.

- Gendreau M., Laporte G., Musaraganyi C., Taillard E., "A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem", *Computers & Operations Research* 26, 1153-1173, 1999.
- Gendreau M., Guertin F., Potvin J., Taillard. E., "Parallel Tabu Search for Real-Time Vehicle Routing and Dispatching". *Transportation Sciences* 33 (4), pages 381-390, 1999b.
- Gendreau M., Hertz A., Laporte G., "New insertion and post optimization procedures for the traveling salesman problem.", *Operations Research*;40:1086-1094, 1992.
- Gendreau M., Laporte G., Séguin R., "Stochastic vehicle routing", *European Journal of Operational Research* 88 3-12, 1996.
- Ghiani, Gianpaolo *et al.*, "Real-time vehicle routing: Solution concepts, algorithms and parallel computing strategies", *European Journal of Operational Research*, Volume 151, Issue 1, 16 November 2003, Pages 1-11, ISSN 0377-2217, DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00915-3. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VCT-484SPB6-1/2/d1720f4efe5e101e6678a9464b246bcd>)
- Laporte G., Gendreau M., Potvin J., Semet F., "Classical and modern heuristics for the vehicle routing Problem", *International Transactions in Operational Research* -vol 7 (2000) 285-300.
- Golden B., Raghavan S., Wasil E., "The vehicle routing problem, latest advances and new challenges", *Operations research/computer science interfaces series*, vol. 43. Springer; 2008. Disponível em http://books.google.com.br/books/about/The_vehicle_routing_problem.html?id=-3ta5ne3-owC
- Gutenschwager K., Niklaus C., Voß. S., "Dispatching of an electric monorail system: applying metaheuristics to an online pickup and delivery problem". *Transportation Science* 38:434-446, 2004.
- Housroum H., Hsu T., Dupas R., Goncalves G., "A hybrid GA approach for solving the Dynamic Vehicle Routing Problem with Time Windows". *Laboratoire de Ge'nie Informatique et Automatique de 'Artois (LGI2A) Faculte' des Sciences Applique'es - Universite d'Artois Technoparc Zone Futura - 62400 Be'thune France, 2006.*

- Ioannou G., Kritikos M., Prastacos G., “A Greedy Look-Ahead Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows.” *Journal of the Operational Research Society* 52, 523–537, 2001.
- Imran A., Salhi S., Wassan A., “A variable neighborhood-based heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem”, *European Journal of Operational Research* 197, 509–518, 2009.
- Irnich S., Villeneuve D., ”The shortest path problem with resource constraints and k-cycle elimination.”, *INFORMS Journal on Computing* 18(3):391–406, 2006.
- Jepsen M., Spoorendonk S., Petersen B., Pisinger D., “A non-robust branch-and-cut-and-price algorithm for the vehicle routing problem with time windows.”, Technical Report no. 06/03 ISSN: 0107-8283. Department of Computer Science, University of Copenhagen; 2006.
- Jepsen M., Spoorendonk S., Petersen B., Pisinger D., “Subset-row inequalities applied to the vehicle-routing problem with time windows.”, *INFORMS Journal on Operations Research* 56(2):479–511, 2008.
- Jia, Yongji *et.al.*, “A Rolling Horizon Procedure for Dynamic Pickup and Delivery Problem with Time Windows”, *International Conference on Automation and Logistics Shenyang, China – 2009*.
- Junior, Orivalde *et al.*, “Roteirização dinâmica de veículos com janelas de tempo usando de um algoritmo de colônias de formigas”, PUC RIO, 2009.
- Kallehaugea B., Larsenb J., Madsena O.,”Lagrangian duality applied to the vehicle routing problem with time windows.”, *Computers & Operations Research* 33(5):1464–87, 2006.
- Karsten Lund, Oli B. G. Madsen, and Jens M. Rygaard. “Vehicle Routing Problems with Varying Degrees of Dynamism”. Technical report, IMM, The Department of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 1996.
- Kohl N., Desrosiers J., Madsen O.B.G., Solomon M.M., Soumis F., “2-Paths cuts for the vehicle routing problem with time windows”, *Transportations Science*, 33, 101-116, 1999.

- Larsen A. "The Dynamic Vehicle Routing Problem". PhD thesis, Technical University of Denmark, Dinamarca, 2001.

- Larsen J., "Parallelization of the Vehicle Routing Problem with Time Windows", Lyngby Ph.D. Thesis no. 62, ISSN 0909-3192, 2001b.

- Li, F., Golden B., Wasil E., "A record-to-record travel algorithm for solving the heterogeneous fleet vehicle routing problem", *Computers and Operations Research*, v 34, n 9, p 2734-2742, 2007.

- Montemanni R., Gambardella L., Rizzoli A., Donati A., "A new algorithm for a Dynamic Vehicle Routing Problem based on Ant Colony System", Technical Report IDSIA-23-02, IDSIA, November 2002.

- Moreira S. *et al.* , "A solution of dynamic vehicle routing problem with time window via ant colony system metaheuristic", 10th Brazilian Symposium on Neural Networks, SBRN 2008, p 21-26, 2008.

- Muller J., "Approximative solutions to the bicriterion Vehicle Routing Problem with Time Windows", *European Journal of Operational Research*, Volume 202, Issue 1, 1 April 2010, Pages 223-231, ISSN 0377-2217, DOI: 0.1016/j.ejor.2009.04.029.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VCT-4W7RYD1-1/2/efc89703712396784e885d57ce05d926>)

- Nagata Y., Bräysy O., "A powerful route minimization heuristic for the vehicle routing problem with time windows", *Operations Research Letters* 37, 333-338, 2009.

- Nagata Y, Bräysy O., Dullaert W., "A penalty-based edge assembly memetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows", *Computers & Operations Research* 37, 724-737, 2010.

- Novoa C., "A Set-Partitioning-Based Model for the Stochastic Vehicle Routing Problem", Technical Report 06T-008 December, 2006.

- Oppen J, Lokketangen A., “A tabu search approach for the live stock collection problem”. *Computers and Operations Research*, 35:3213–29, 2008.
- Osman I., Salhi S., "Local search strategies for the mix fleet routing problem", *Modern Heuristic Search Methods*. Wiley,Chichester,pp.131–153, 1996.
- Paraskevopoulos D., Repoussis P., Tarantilis C., Ioannou G., Prastacos G.,”A reactive variable neighborhood tabu search for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows.”, *Journal of Heuristics*;14:425–55, 2008.
- Pavone, M. (Laboratory for Information and Decision Systems, Aeronautics and Astronautics Department, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, United States); Bisnik, N.; Frazzoli, E.; Isler, V. Source: *Mobile Networks and Applications*, v 14, n 3 SPEC. ISS., p 350-364, June 2009, Selected Papers from ROBOCOMM 2007: The First International Conference on Robot Communication and Coordination.
- Pessoa A., Uchoa E., De Aragão M., “A robust branch-cut-and-price algorithm for the heterogeneous fleet vehicle routing problem”, *Networks*, v 54, n 4, p 167-177, December 2009
- Potvin J., Rousseau J., "A Parallel Route Building Algorithm for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Windows", *European Journal of Operational Research* 66, 331-340, 1993.
- Potvin J., Rousseau J., “An Exchange Heuristic for Routing Problems with Time Windows”, *Journal of the Operational Research Society* 46, 1433–1446, 1995.
- Potvin J., Dubé D., “Improving a vehicle routing heuristic through genetic search”. In *ICEC’94* [1679], pages 194–199, 1994.
- Prins Christian, “Two memetic algorithms for heterogeneous fleet vehicle routing problems”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v 22, n 6, p 916-928, September 2009.
- Psaraftis, H.N. “Dynamic Programming Solution to the Single Vehicle Many-to-many immediate request Dial-a-ride Problem”. *Transport Science* 14, 130-154, 1980.

- Psaraftis, H.N. "Dynamic vehicle routing problems". In: GOLDEN, B.L.; ASSAD, A.A. (Ed.). *Vehicle routing: methods and studies*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1998. p.223-248.
- Renaud J., Boctor F., "A sweep-based algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem", *European Journal of Operations Research* 140,618–628, 2002.
- Repoussis P.P., Tarantilis C.D., Bräysy O., Ioannou G., "A hybrid evolution strategy for the open vehicle routing problem", *Computers & Operations Research* 37,443-455, 2010.
- Rochat Y, Semet F., "A tabu search approach for delivering pet food and flour in Switzerland", *Journal of the Operational Research Society*;45:1233–46, 1994.
- Rochat Y, Taillard E. "Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing.", *Journal of Heuristics*;1:147-167, 1995.
- Russell R., "Hybrid heuristics for the vehicle routing problem with time windows", *Transportation Science* 29, 156-166, 1995.
- Semet F, Taillard E., "Solving real-life vehicle routing problems efficiently using tabu search". *Annals of Operations Research*;41:469–88, 1993.
- Schulze J., Fahle T., "A parallel algorithm for the vehicle routing problem with time window constraints", *Annals of Operations Research* 86, 585–607, 1999.
- Solomon, Marius, "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints", *Operations Research*, Vol. 35, No. 2 (Mar. - Apr., 1987), pp. 254-265
- Sungur I., Ordóñez F., Dessouky M., "A robust optimization approach for the capacitated vehicle routing problem with demand uncertainty", *IIE Transactions* 40, 509–523, 2008.
- Wassan N., Osman I., "Tabu search variants for the mix fleet vehicle routing problem", *Journal of the Operations Research Society* 53,768–782, 2002.

Apêndices

Apêndice A – O sistema TruckStops®

O objetivo deste capítulo é mostrar como o sistema de roteirização *TruckStops*®, produzido pela empresa *MicroAnalytics*, implementa suas heurísticas para a construção e melhoria dos roteiros.

Não serão detalhados aspectos da operação do sistema ou de sua configuração. Para maiores detalhes sobre o sistema, caso tenha interesse, o leitor pode entrar em contato direto com o fabricante através do site www.bestroutes.com.

1 - Descrição Geral

TruckStops® é um sistema de roteirização de veículos, o que significa que sua função básica é processar os pedidos e a frota disponíveis, decidindo que pedidos serão carregados em quais veículos e em que ordem, buscando reduzir o custo total. As rotas são desenvolvidas sem que as restrições impostas, como por exemplo, de janela de entrega, tempos de entregas, capacidades, etc., sejam violados.

O sistema leva em consideração informações sobre os clientes, pedidos, veículos, distâncias, tempos de viagem, leis, políticas das empresas e suas próprias parametrizações usando-as nos processos de decisão, construção e melhoria dos roteiros.

2 - Cálculo de Distâncias e Tempos de Viagem

2.1 - Distância

Uma vez que o sistema constrói rotas e avalia mudança entre os pedidos a todo momento, ele precisa constantemente ter a distância e o tempo de viagens em mãos para cada par de serviços a serem atendidos.

Existem três métodos para obtenção desta informação:

Método 1: Distância em linha reta com aplicação de fator de correção

A distância é determinada através da seguinte fórmula de cálculo de distância linear no plano cartesiano:

$$d = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2}$$

onde o par (x_1, x_2) e (y_1, y_2) representam as coordenadas do ponto X e do ponto Y respectivamente. Depois de determinada, a distância é multiplicada pelo fator de correção para se obter uma estimativa melhor.

Método 2: Distância em linha reta com influência de Barreiras

Barreiras são obstáculos naturais que têm grande influência no trajeto dos veículos como, por exemplo, rios, lagos, túneis, montanhas, etc. e que precisam ser consideradas no cálculo de distância pois, ou precisam ser contornados pelos veículos, ou porque possuem pontos exatos por onde podem ser transpostos, chamados de pontos de transição. Apesar de melhorar a solução final dos roteiros, seu uso é opcional.

No cálculo da distância reta entre dois pontos, o sistema verifica se uma barreira é atingida ou não. Em caso positivo, a distância é reajustada considerando-se que o veículo irá contornar a barreira ou, caso haja pontos de transição, que o veículo passará por eles. Posteriormente é aplicado o fator de correção caso tenha sido informado.

Método 3: Distância real informada

O sistema pode simplesmente obter de um arquivo fornecido pelo usuário qual é a distância real entre os pontos envolvidos.

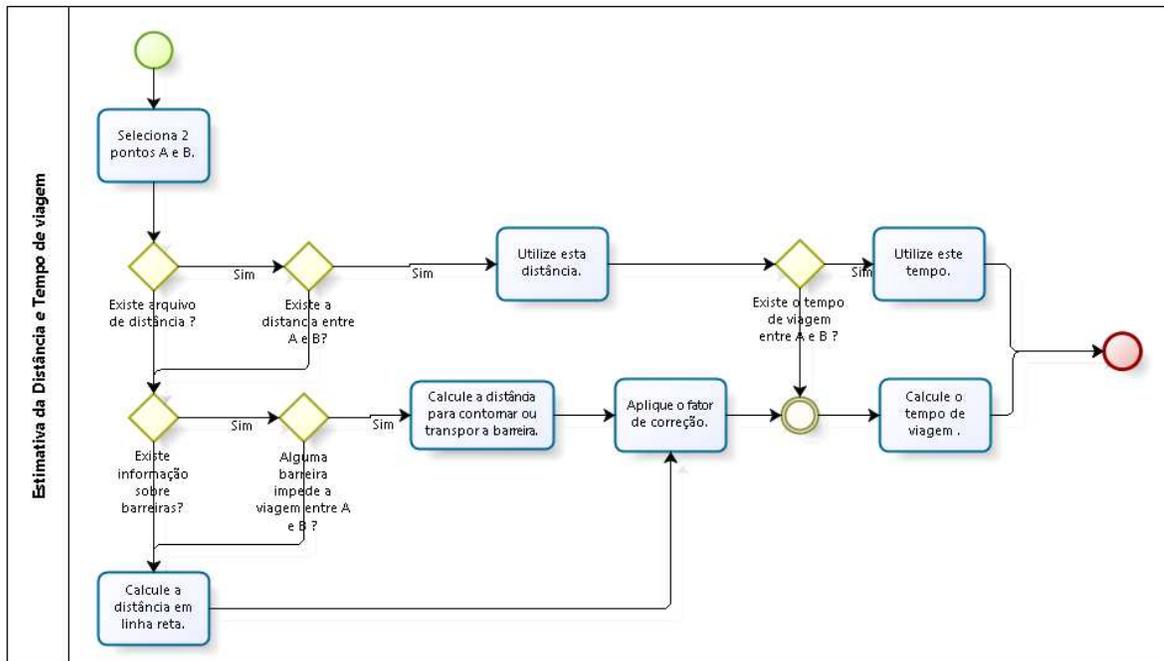


Figura 1: Fluxograma da Estimativa de Distância e Tempo de Viagem. Fonte: *MicroAnalytics*

2.2 - Tempo de Viagem

Da mesma forma, o cálculo dos tempos de viagem entre os pontos pode ser obtido por dois métodos:

Método 1: Baseado na velocidade

Para qualquer um dos métodos de cálculo de distância, o sistema calcula o tempo de viagem baseado na velocidade fornecida pelo usuário.

Método 2: Tempo de viagem informado

O tempo de viagem real entre os pontos é fornecido pelo usuário através de um arquivo.

3 - Lógica de Análise dos Roteiros

3.1 - Processo de construção dos roteiros

O processo de carregamento de cada veículo consiste em encontrar um serviço inicial e então, ir selecionando outros serviços factíveis que sejam próximos ao centro da rota até que nenhum serviço possa ser adicionado. Quando a análise envolve apenas um terminal, o serviço inicial usado é o mais distante do terminal.

Da mesma forma, o sistema precisa escolher em qual veículo carregar a entrega selecionada. A menos que haja alguma restrição ou ordem contrária, o sistema tenta carregar o máximo de serviços no maior veículo. Quando não se puder mais carregar serviços no veículo selecionado, o sistema tenta mudar o roteiro para um veículo menor que esteja disponível.

A Figura 2 mostra o fluxo de como funciona o processo básico de construção de rotas. Já as Figuras 3 e 4 demonstram o processo de carregamento com um grupo de entregas, onde T representa o terminal, C é o centro da rota e o serviço escolhido é circulado em destaque.

As seguintes definições ajudam no entendimento:

- a) Centro da Rota – é o ponto médio geográfico da rota levando em consideração todos os pontos carregados até o momento e sem incluir o terminal.

- b) Entrega mais próxima – é a entrega ainda não carregada que seja mais próxima do centro da rota. A proximidade é medida em termos de tempo de viagem, o que inclui tempo de direção e tempo de espera no cliente, caso o veículo atinja o ponto antes da janela de tempo ter sido iniciada.

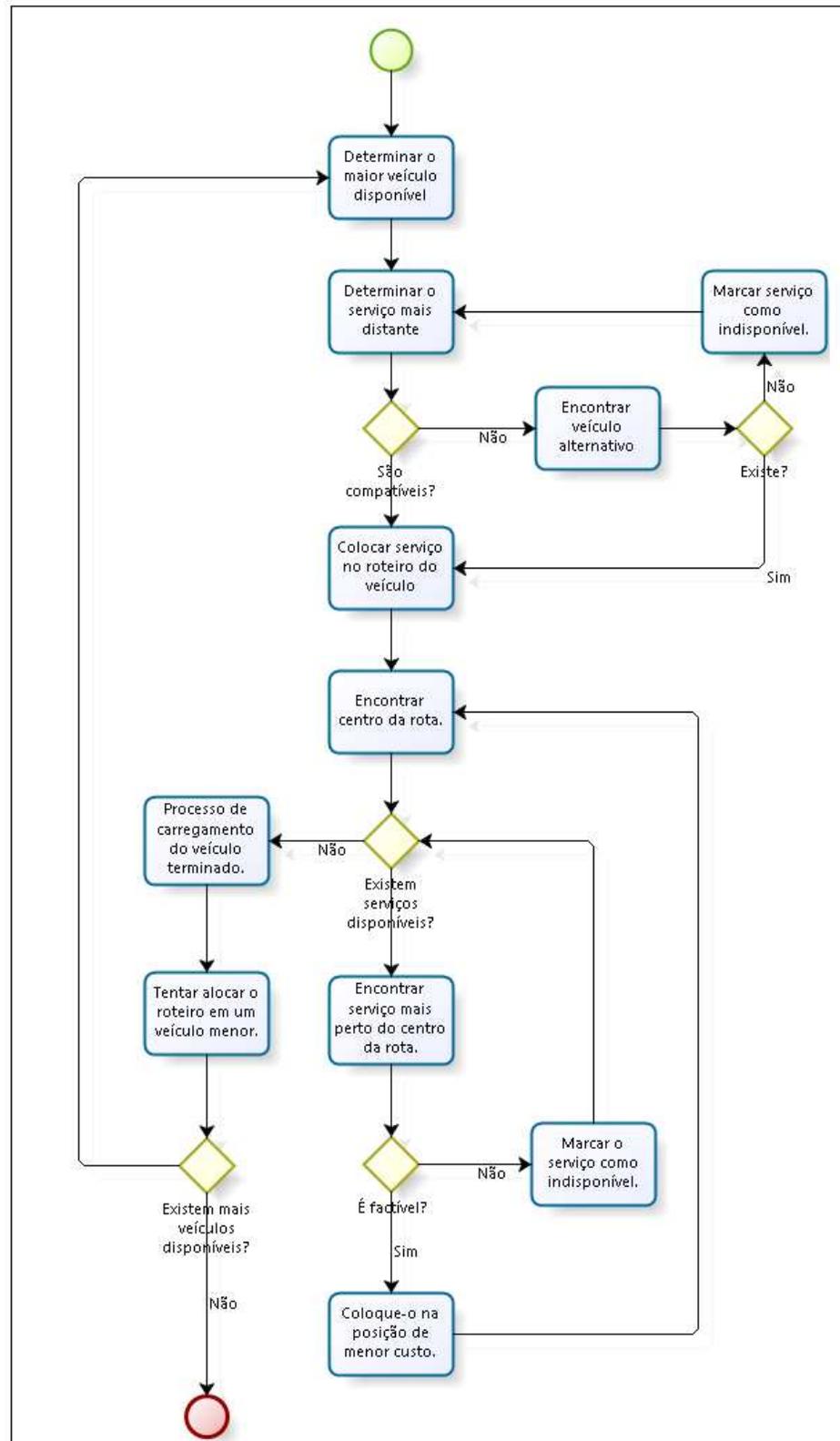


Figura 2: Processo Básico de construção de rotas. Fonte: *MicroAnalytics*

Assim uma entrega pode estar geograficamente próxima ao centro da rota, mas não ser capaz de ser servida por várias horas devido à janela de horário. Nesta situação, a entrega mais próxima seria uma que leve mais tempo para ser atingida, mas possa ser atendida logo que o veículo chegue no ponto.

c) Maior veículo – O maior veículo é aquele que tem pelo menos uma das capacidades de carregamento maior que os demais veículos disponíveis.

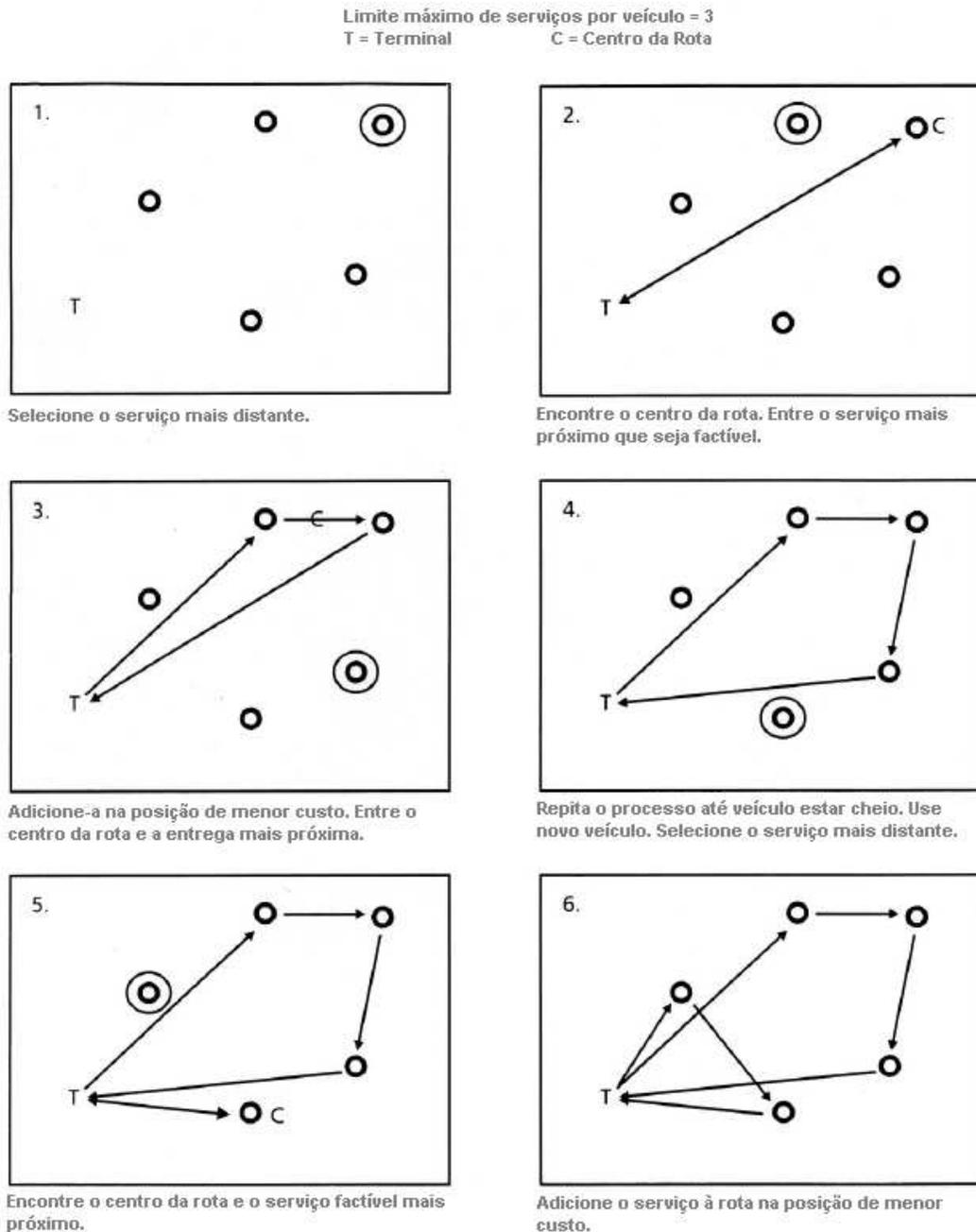


Figura 3: Exemplo do processo de Construção de rota. Fonte: *MicroAnalytics*

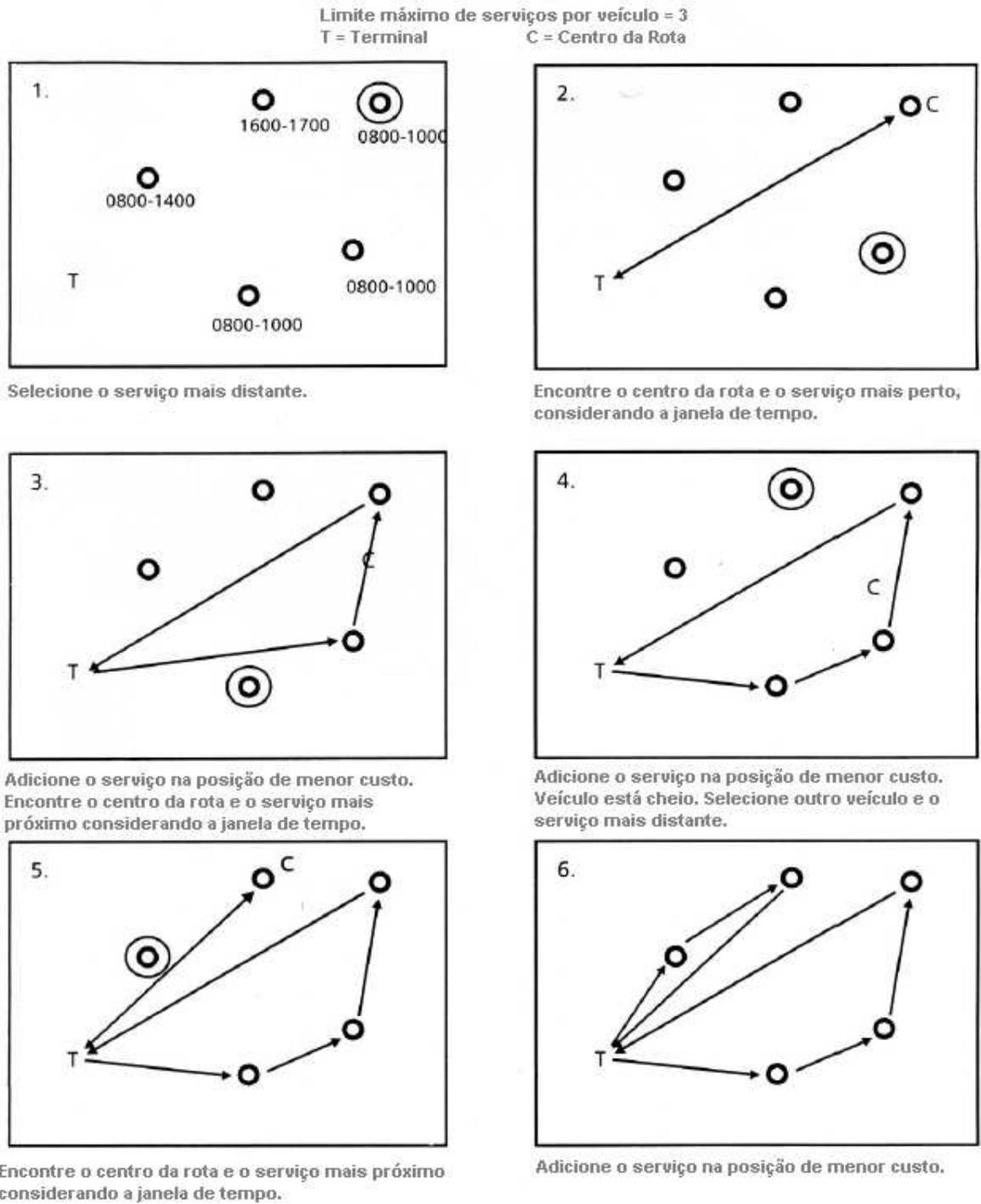


Figura 4: Exemplo do processo de Construção de rota com janela de tempo. Fonte:

MicroAnalytics

3.2 - Processo de melhoria dos roteiros

O objetivo principal da fase de construção é atribuir os serviços aos veículos disponíveis construindo sua rota sem que nenhuma restrição seja violada. Após esta etapa, inicia-se uma etapa de refinação das rotas, buscando alterá-las de forma a se obter reduções de custo. É importante citar que o problema resolvido pelo sistema é o conhecido Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes.

A heurística básica seguida pelo sistema é a de selecionar blocos contínuos de serviços em uma rota e tentar encontrar uma outra posição alternativa no itinerário, do próprio veículo ou de outro, que seja factível e ao mesmo tempo reduza o custo. Também são examinadas outras posições alternativas para blocos formados na ordem inversa do bloco original.

A rotina continua até que não sejam mais encontradas economias ou que algum parâmetro interno seja atingido, como por exemplo, o número máximo de interações ou tempo de processamento. A rotina de otimização testa blocos de serviços em ordem decrescente de tamanho, iniciando com um tamanho N , onde $N > 1$, e reduzindo-o até que sejam testados blocos de um único serviço. Existem dois processos de otimização no sistema chamados de Otimização de Veículo Único e Otimização Múltipla de Veículos.

3.2.1 - Otimização de Veículo Único

Este processo é ilustrado na Figura 5, iniciando-se por blocos de tamanho três. Uma vez selecionado um bloco contínuo de serviços, a rotina começa a testá-lo em outras posições no mesmo roteiro. Os testes consistem em responder a duas questões: “Se esta alteração for feita, ela ainda é factível sem quebrar nenhuma regra?” e “O custo desta rota será reduzido se este bloco for movido para esta posição?”.

Se a resposta for negativa para pelo menos uma das perguntas, a rotina ignora o movimento e teste o bloco em uma nova posição. Se for positiva para ambas as questões, a rotina guarda a redução encontrada e continua o processo. Ao final do processo para este bloco, a rotina verifica

qual foi a posição que gerou a maior redução de custo e efetiva as mudanças no roteiro. Caso existam mais blocos de mesmo tamanho, o processo é repetido. Esgotando-se as possibilidades para este tamanho de bloco, passa-se a testar blocos de tamanho menor até se esgotarem todas as possibilidades.

Otimização de Veículo Único

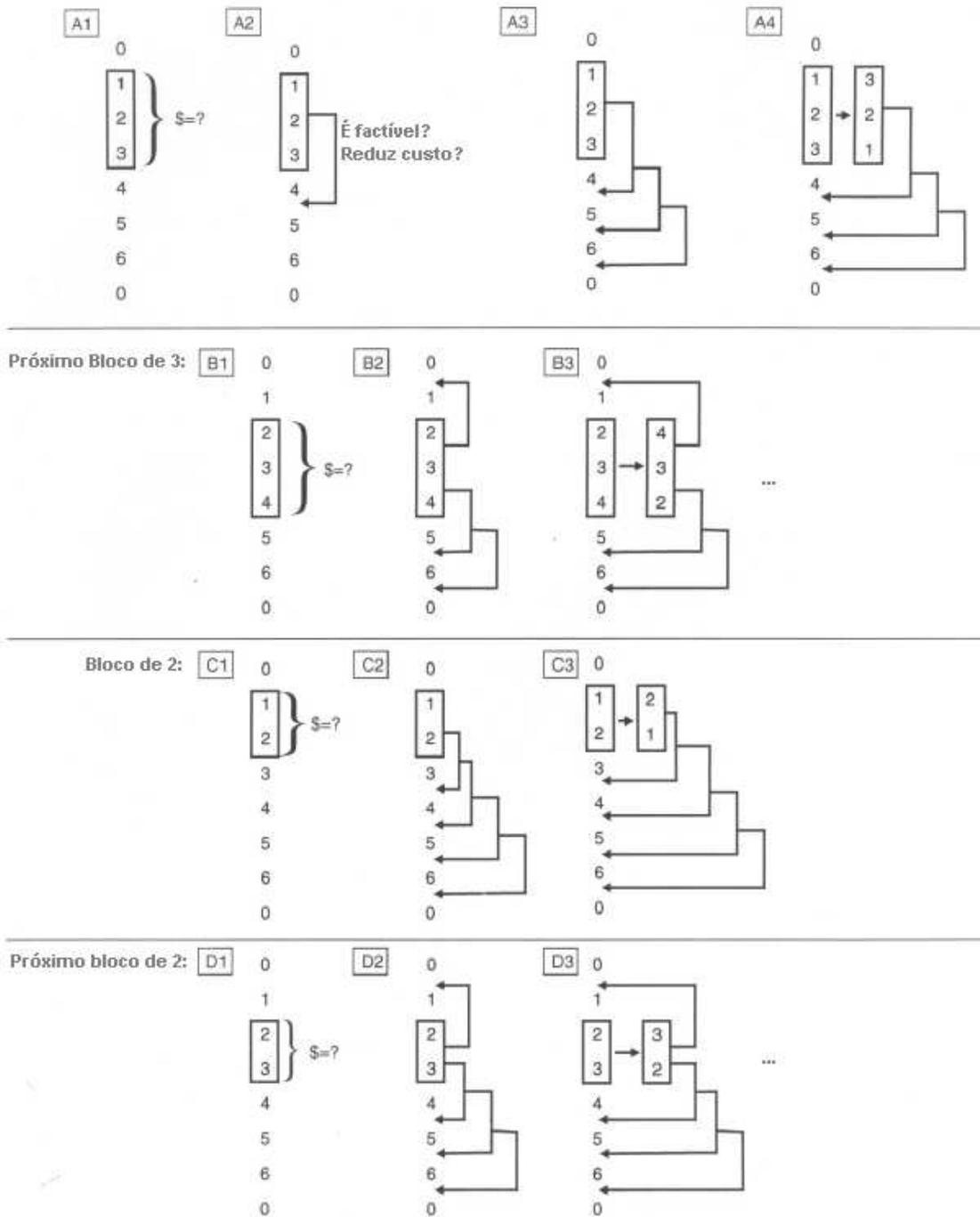


Figura 5: Processo de Otimização de um veículo único. Fonte: *MicroAnalytics*

3.2.2 - Otimização Múltipla de Veículos

Nesta etapa um bloco contínuo de serviços de um veículo é testado em posições alternativas em outros veículos buscando por reduções de custo. Da mesma forma que citado anteriormente, também são testados os blocos na sua ordem inversa.

Na otimização múltipla, uma vez que se está movendo blocos de serviços de um “veículo-origem” para um “veículo-destino”, várias posições não são factíveis já que o veículo-destino pode, em algum sentido, já estar cheio. Assim, as possibilidades de otimização podem ser aumentadas se alguns serviços do veículo-destino forem removidos, gerando mais espaço para os blocos vindos do veículo-origem. Neste sentido, esta etapa do processo oferece três formas de tratar os serviços no veículo-destino:

- a) Não fazer nada, ou seja, apenas tentar incluir os blocos no veículo-destino. Este método é chamado de movimento único.
- b) Trocar serviços do veículo-destino com serviços do veículo-origem. Este método é chamado de Permuta.
- c) Mover serviços do veículo-destino para outro veículo diferente do veículo-origem. Este método é chamado de Triangulação.

Basicamente a quantidade de tempo necessária nestas otimizações aumenta consideravelmente quando se aumenta a quantidade de opções de testes, mas existem mais chances de se encontrar reduções de custo. Estes métodos são descritos a seguir em maiores detalhes.

3.2.2.1 - Movimento Único

Ilustrado na Figura 6, este método é muito similar ao processo de otimização de um único veículo exceto pelo fato de que ao invés de mover o bloco no mesmo veículo, ele é movido para outro veículo.

Movimento Único

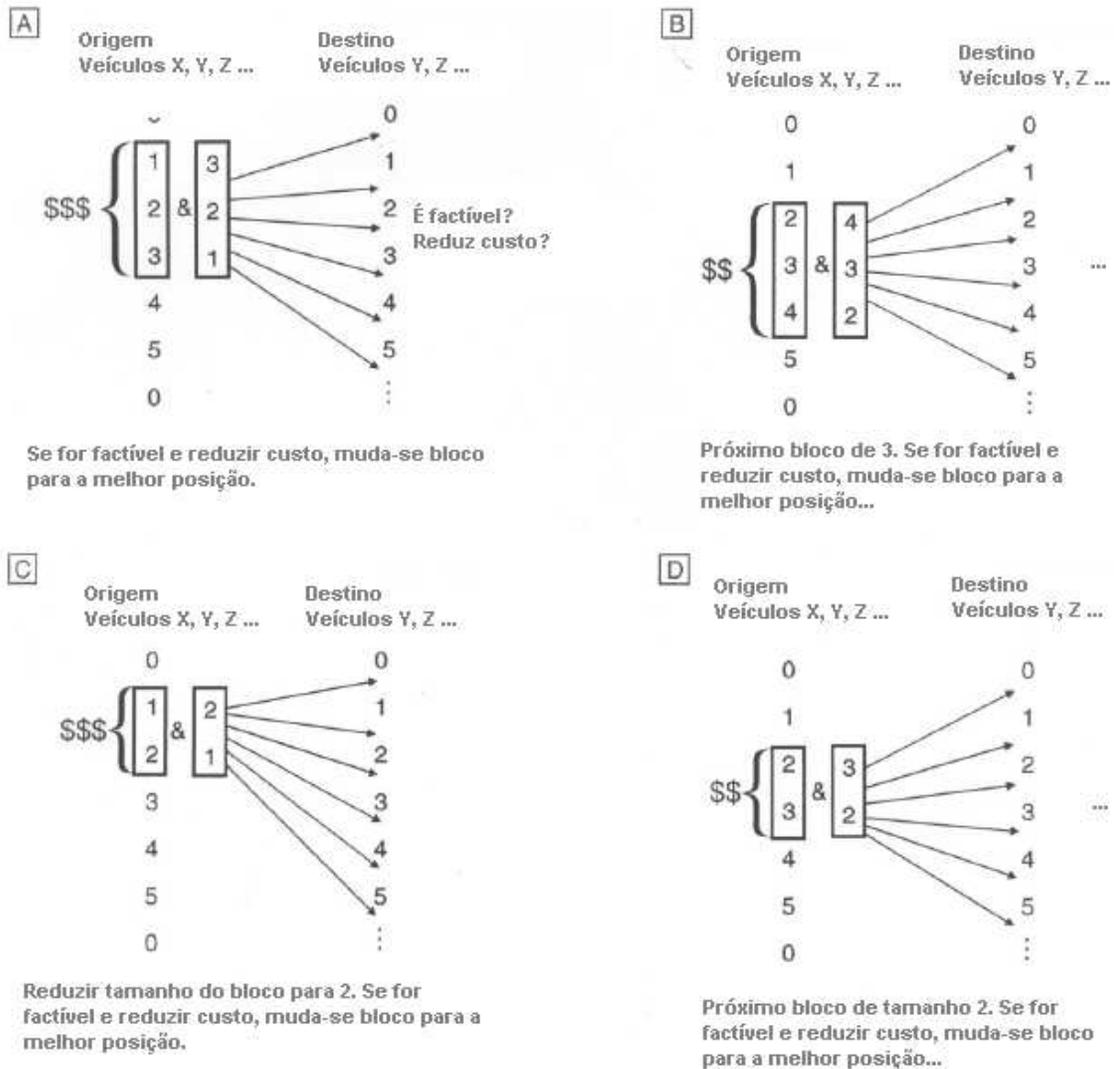


Figura 6: Otimização Múltipla – Movimento Único. Fonte: *MicroAnalytics*

3.2.2.2 - Permuta

A avaliação dos movimentos de permuta ocorre como uma etapa adicional, juntamente com a avaliação dos movimentos únicos. Em outras palavras, se a rotina está avaliando permutas, ela irá executar a otimização conforme descrito acima em Movimentos Únicos, mas levando em consideração a possibilidade de fazer troca de serviços entre os veículos envolvidos.

Se um bloco de serviços puder ser movido do veículo-origem para o destino sem que seja preciso que serviços do veículo-destino sejam removidos, a rotina não fará esta permuta, realizando

apenas um movimento único. Entretanto, se o veículo-destino não aceitar o bloco de serviços, as permutas serão tentadas.

No sentido de encontrar a melhor posição no veículo-destino, a rotina deve também decidir quantos e quais serviços devem ser trocados entre os dois veículos, além de determinar a melhor posição no veículo de destino. O movimento de permuta, exemplificado na Figura 7, compara muito mais alternativas e toma mais tempo computacional que o processo de Movimento Único.

Quando o processo inicia, esta rotina começa retirando um serviço de cada vez do veículo-destino e quando forem esgotadas todas as possibilidades, passará a trabalhar com bloco de dois serviços e assim por diante até atingir o limite estabelecido pelo usuário. Este limite pode ser, além do tamanho dos blocos, um tempo máximo permitido de processamento.

3.2.2.3 - Movimento de Triangulação

Este processo difere dos anteriores pelo fato de envolver um terceiro veículo ao invés de apenas dois.

O movimento de triangulação analisa blocos de serviços do veículo-origem tentando colocá-los no veículo-destino, enquanto retira serviços do veículo-destino e tenta colocá-los em um outro veículo.

Cada avaliação requer que:

- a) a colocação do bloco do primeiro veículo-destino no segundo veículo-destino seja factível.
- b) a colocação do bloco do veículo-origem no primeiro veículo-destino seja factível.
- c) o resultado desta combinação produza redução do custo da solução.

Permuta

Tamanho Bloco Origem = 3
 Tamanho máximo do Bloco do Veículo Destino = 3

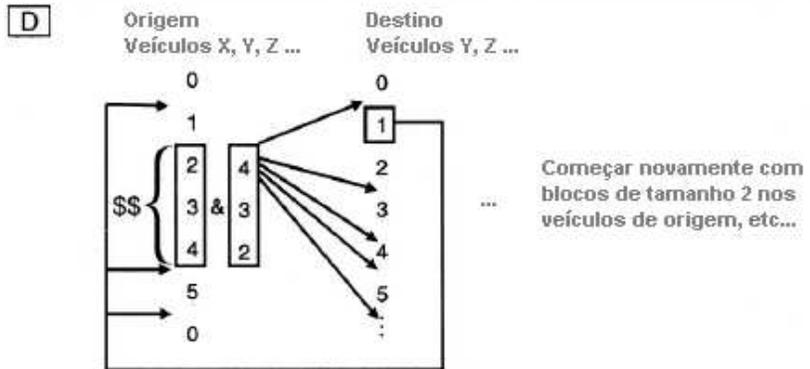
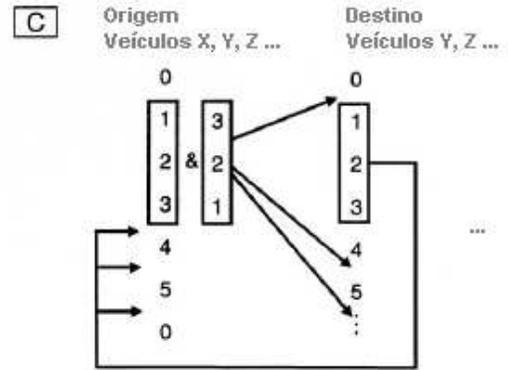
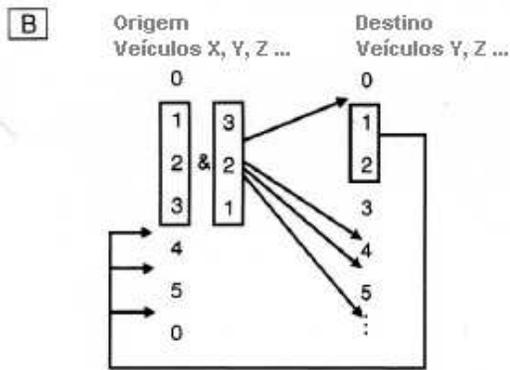
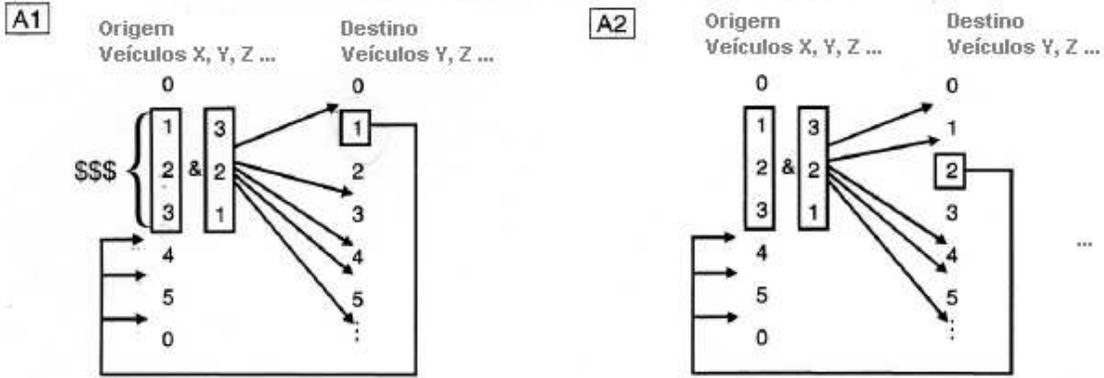


Figura 7: Otimização Múltipla – Movimento de Permuta. Fonte: *MicroAnalytics*

Nesta rotina pode-se limitar o tamanho do bloco que será retirado do primeiro veículo-destino para o segundo. No sentido de se tentar obter mais oportunidades de melhoria, ambos os blocos dos veículos de origem e destino são também testados em sua ordem inversa.

Pode-se perceber que esta rotina requer a avaliação de uma quantidade grande de combinações e conseqüentemente maior tempo de processamento. A Figura 8 ilustra este processo. Neste exemplo, a rotina trabalha com um bloco de três serviços e tenta movê-lo para o veículo-destino enquanto move um serviço do veículo-destino para outro veículo.

Isto é feito para todas as possibilidades movendo-se blocos de tamanho um. O processo é repetido com o mesmo bloco vindo do veículo-origem só que agora são avaliadas as retiradas de blocos de tamanho dois entre o veículo-destino e o terceiro veículo. Finalmente o processo se repete até se atingir o tamanho máximo, que neste caso é três. Esgotadas as possibilidades, o bloco do veículo-origem é mudado para a posição que gera maior redução de custo.

O processo se inicia novamente, agora com um próximo bloco de tamanho três vindo do veículo-origem. Terminada a análise dos blocos de tamanho três do veículo-origem, o tamanho do bloco passa a ser dois e o processo se inicia novamente, seguindo esta lógica até se esgotarem as possibilidades.

O fabricante afirma que esta rotina não é geralmente usada, pois aparentemente não gera economias que justifiquem o grande tempo necessário para obtê-las. Logo indica que este processo deve ser evitado a menos que se esteja trabalhando em circunstâncias especiais, como por exemplo, quando os veículos possuem poucos serviços em seus roteiros (menos de quatro ou cinco serviços por roteiro) e onde a limitação principal seja apenas a limitação física do veículo.

Movimento de Triangulação

Tamanho Bloco Origem = 3
 Tamanho máximo do Bloco do Veículo Destino = 3

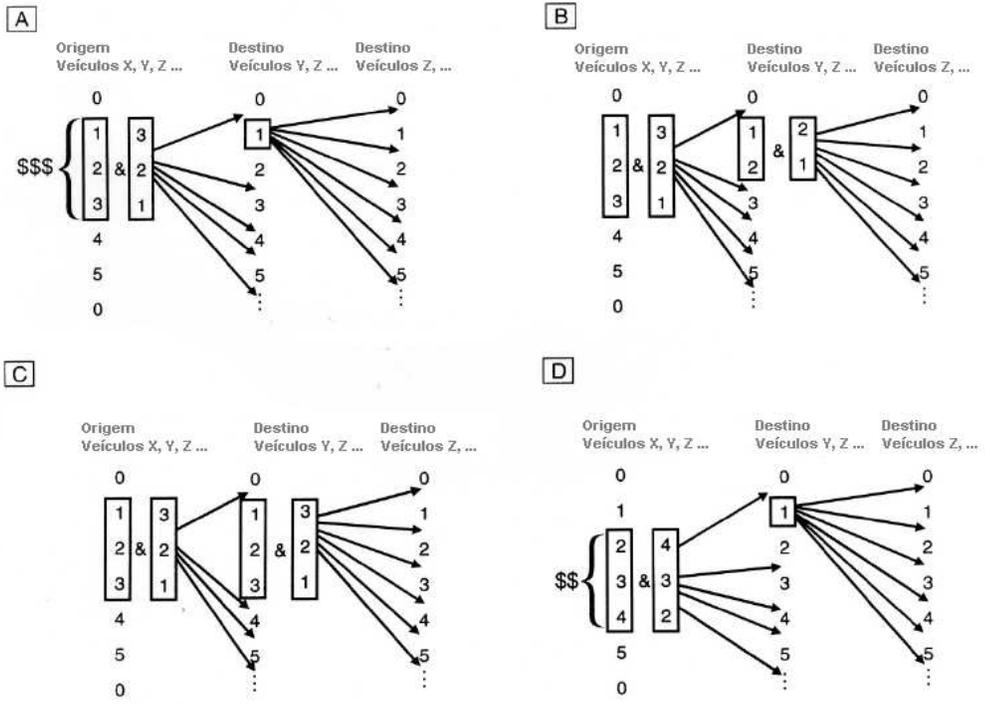


Figura 8: Otimização Múltipla – Movimento de Triangulação. Fonte: *MicroAnalytics*

Apêndice B - Heurística de melhoramento intrarrota 2-opt

Após a inserção de uma solicitação dinâmica na rota de um veículo que foi planejada anteriormente, é necessário refazer seu itinerário, pois esta alteração pode resultar numa rota passível de otimização.

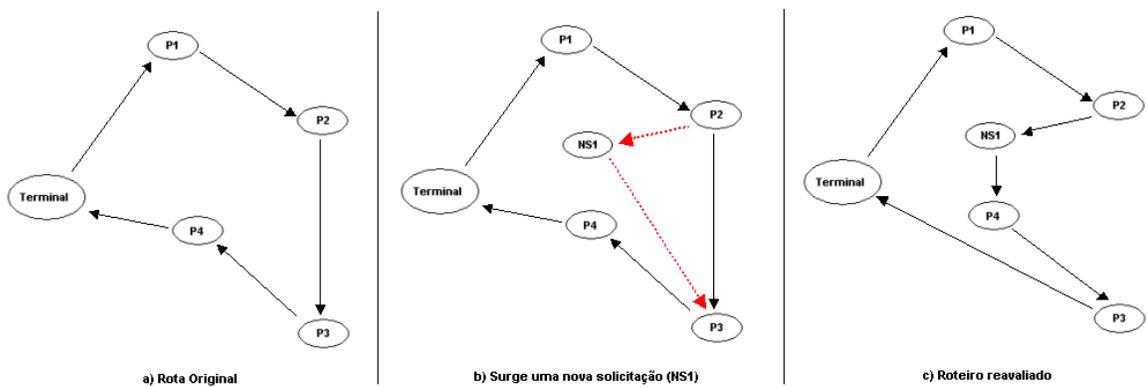


Figura 1: exemplo de refinamento de roteiro após entrada de nova solicitação.

Neste trabalho utiliza-se para este fim a heurística de melhoramento de rotas 2-opt de Lin e Kernighan (1973) que é apresentada de forma reduzida a seguir.

A idéia central deste método é, dada uma rota formada por pontos (clientes) e arestas (ligações entre os clientes), eliminar duas arestas não consecutivas e inserir duas novas de forma cruzada, ou seja, se as arestas removidas foram os pares que ligam as cidades $(c1, c2)$ e $(c3, c4)$, as arestas inseridas ligam as cidades $(c1, c4)$ e $(c2, c3)$.

Caso a inversão resulte em um roteiro mais econômico, esta alteração é efetivada no itinerário, caso contrário, não. O processo continua procurando por mais reduções nas combinações de arestas seguintes até que não sejam mais encontradas melhorias.

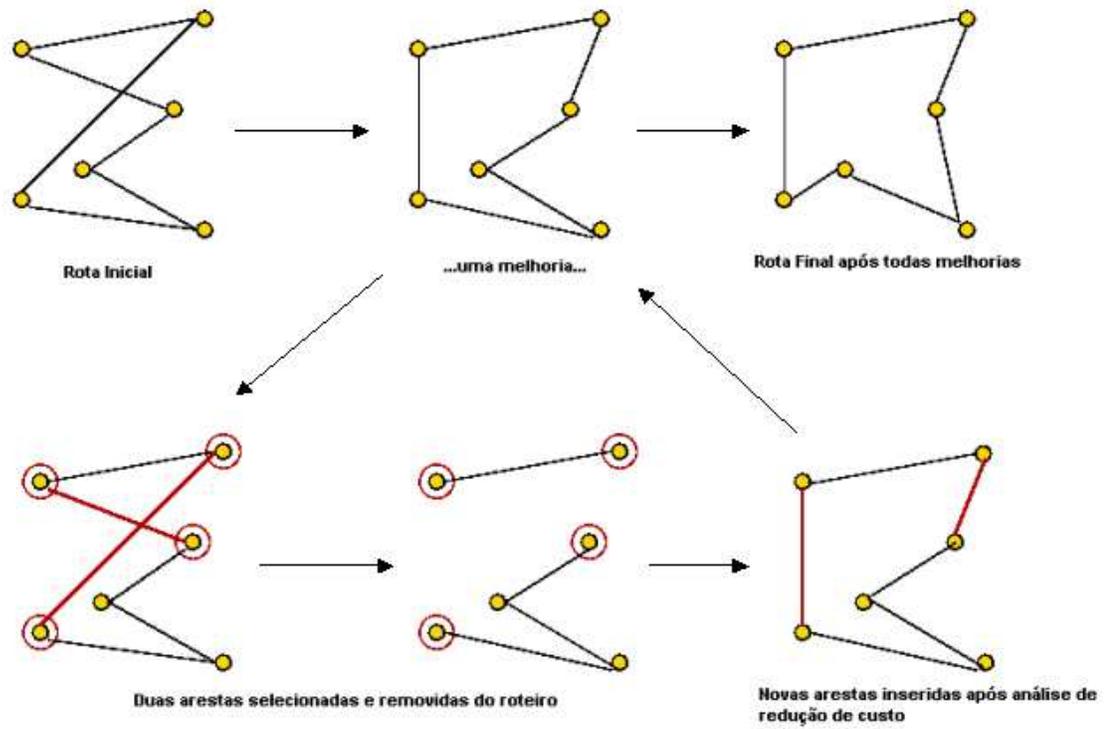


Figura 2: exemplo do método 2-opt

Apêndice C - Heurística II

O objetivo deste capítulo é detalhar o funcionamento da heurística II implementada por Solomon (1987) mostrando os resultados computacionais obtidos pelo autor que levaram este método a ser adotado na solução de um caso prático de VRPTW.

1 - Descrição Geral

Esta heurística é considerada como pertencente à classe dos métodos de inserção. Seu primeiro passo consiste em determinar qual cliente ainda não adicionado a nenhuma rota dará início ao roteiro. Existem dois critérios para tal decisão inicial:

- Utilizar cliente mais distante do terminal de origem dos veículos.
- Utilizar o cliente cujo horário final da janela de tempo possua o menor valor (janela mais restrita).

Tais critérios são exclusivos, ou seja, escolhendo-se um deixa-se o outro de lado.

Uma vez iniciada uma rota, passa-se para o segundo passo que consiste em determinar qual o cliente ainda não inserido em nenhum roteiro que deve ser inserido no roteiro em construção e em qual posição isto deve ocorrer.

Considera-se o conjunto $I = (i_0, i_1, i_2 \dots i_n)$ constituído pelos pontos que formam a rota em construção com $n-1$ clientes, sendo $i_0 = i_n$ (terminal de onde saem os veículos). A cada interação dois critérios $c_1(i,u,j)$ e $c_2(i,u,j)$ são avaliados para se inserir um cliente u entre os clientes i e $j \in I$.

O primeiro critério $c_1(i,u,j)$ determina a melhor posição de inserção dentro do roteiro em construção para cada um dos pontos ainda não roteirizados.

O critério $c_1(i,u,j)$ é dado por :

$$c_1(i(u), u, j(u)) = \min [c_1(i_{p-1}, u, i_p)] , \text{ onde } p = 1, 2, \dots, n$$

onde:

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

e

$$c_{11}(i,u,j) = d_{iu} + d_{uj} - \mu d_{ij}, \quad \mu \geq 0$$

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

onde:

- b_{ju} é o novo horário inicial do cliente j após a inserção de u entre i e j no roteiro em construção; e
- d_{ij} é a distância entre os pontos i e j .

Obviamente a inserção de novo ponto no roteiro pode torná-lo ineficaz devido a não ser mais possível atender todos os clientes dentro de suas janelas de horário, capacidade, etc. Após determinar sua posição ideal, a factibilidade do roteiro deve ser testada e, caso não seja possível ser mantida, o cliente é descartado como candidato à inserção no roteiro.

A função c_{11} determina o acréscimo de distância e a função c_{12} o aumento do horário de chegada no cliente j , gerado pela inserção de u no roteiro entre os pontos i e j . Portanto a função c_1 corresponde a aumento de distância e tempo causado pela inserção de u e sua melhor posição de inserção é aquela que minimiza o valor de c_1 .

O segundo critério $c_2(i,u,j)$ determina qual será o cliente u que será inserido entre i e j que maximiza a função $c_2(i(u),u,j(u))$:

$$c_2(i(u^*),u^*,j(u^*)) = \max [c_2(i(u),u,j(u))]$$

e

$$c_2(i,u,j) = \lambda d_{0u} - c_1(i,u,j), \quad \lambda \geq 0$$

A função c_2 mede a diferença entre a distância do terminal até o ponto a ser inserido u e o aumento da distância e tempo gerado por esta inserção.

Este tipo de método de inserção tenta maximizar o benefício de se atender um cliente a partir de uma rota em construção ao invés de atendê-lo a partir de um veículo saindo diretamente do terminal. Claramente, diferentes valores de λ , μ , α_1 e α_2 levam a diferentes critérios de seleção e consequentemente geram diferentes soluções.

Desenvolvimento de Conjuntos de Problemas para testes

Solomon (1987) estabeleceu 6 conjuntos de problemas, num total de 56 problemas, destacando vários aspectos que podem influenciar a solução de um VRPTW. Dentre eles pode-se citar:

- dados geográficos dos pontos;
- número de clientes atendidos por veículo; e
- características das janelas de horário como percentual de clientes com janela de atendimento, o quão apertadas estas janelas são, etc.

Os 6 conjuntos de problemas foram denominados de $R1$, $C1$, $RC1$, $R2$, $C2$ e $RC2$. A saber:

- Os grupos *RI*, *CI* e *RCI* possuem um horizonte de programação de itinerário de curta duração. Já os problemas *R2*, *C2* e *RC2*, de longa duração.
- Os grupos *RI* e *R2* possuem as posições geográficas de seus pontos de atendimento geradas de forma aleatória através de uma distribuição aleatória uniforme.
- Nos grupos *CI* e *C2*, os pontos de atendimento são agrupados em regiões.
- Nos grupos *RCI* e *RC2*, existe uma mistura de pontos gerados aleatoriamente e pontos agrupados em regiões.

Características gerais dos conjuntos de problemas:

- Todos os conjuntos de problemas possuíam 100 clientes.
- Foram geradas janelas de atendimento aleatórias variando-se o percentual de cliente que possuíam tais janelas em 25, 50, 75 e 100%.

Resultados computacionais

Cada um dos problemas foi submetido a diversas heurísticas como, por exemplo, *I1*, *I2*, *I3*, *NN* (*Nearst Neighbor*) e *S* (*Sweep*). Em todos os casos os tempos de resposta dos algoritmos foram bastante eficientes. Através dos estudos computacionais realizados observa-se que o método que leva aos melhores resultados é o método *I1*. Detalhes podem ser visto diretamente em Solomon (1987).

Solomon ainda sugere através de seus estudos que o método de inicialização dos roteiros que gera os melhores resultados para os casos de curta duração é o do cliente mais distante, ao passo que para roteiros de longa duração, o método de inicialização mais indicado é o do cliente com janela mais restrita.

Analisando mais a fundo os problemas solucionados pela heurística *I1*, Solomon observa que o critério de inserção por tempo (onde $\alpha_1 = 0$ e $\alpha_2 = 1$) é mais eficiente, na maioria dos casos estudados, que o critério por distância (onde $\alpha_1 = 1$ e $\alpha_2 = 0$), tanto para programações de curta ou longa duração dos itinerários.

Tabela I Comparação dos Algoritmos no conjunto R1						
Algoritmo	Valores médios das soluções e tempos de CPU		% de desvio em relação a Solução Ótima		Qte. de Soluções ótimas encontradas	
Savings (SAV)	3116.3	16.6	15.6%	22%	0	
	1498.9		4.3%			
	617.4	2.4	138.6%			
Savings, waiting time limit (SWT)	2925.2	15.1	8.5%	11%	0	
	1517.2		5.6%			
	408.1	4.7	57.7%			
Insertion criterion i (I1)	2695.5	13.6	0.0%	0%	11	
	1436.7		0.0%			
	258.8	24.7	0.0%			
Insertion criterion ii (I2)	2888.1	14.5	7.1%	6.6%	0	
	1638.7		14.1%			
	249.4	25.5	-3.6%			
Insertion criterion iii (I3)	2855.1	14.1	5.9%	3.7%	1	
	1651.7		15.0%			
	203.3	31.7	-21.4%			
Nearest Neighbor (NN)	2968.7	14.5	10.1%	6.6%	0	
	1600.1		11.4%			
	368.0	8.9	42.2%			
Sweep (S)	2817.4	14.6	4.5%	7.3%	0	
	1499.7		4.4%			
	317.7	18.2	22.8%			

Tabela 1: Comparativos entre algoritmos no conjunto R1. Fonte: Solomon (1987)

Da mesma forma, analisando-se o parâmetro λ , o autor mostra que para $\lambda = 2$ são obtidos a grande maioria das melhores soluções quando aplicadas aos conjuntos de dados. Em todos os casos, o parâmetro μ foi mantido igual a 1.

Apêndice D - Dados

A seguir são expostos os dados utilizados nos simulados realizados no estudo prático.

1 – Dados dos serviços

Os dados aqui expostos referem-se aos serviços previamente conhecidos e que serviram de base para a montagem dos roteiros dos veículos nos dias de análise.

Detalhamento dos campos abreviados:

ID – Identificador usado para diferenciar cada um dos serviços, deixando-os anônimos.

Data – Data na qual o serviço foi realizado e consequentemente é a data usada para agrupar os serviços no simulado.

Tempo Parada – Tempo em minutos gastos para se realizar o serviço

Janela Inicial e Final – Janela de horário na qual o veículo precisa chegar no serviço para realizá-lo.

	ID	ENDERECO	BAIRRO	CIDADE	UF	CEP	PESO	DATA	TEMPO PARADA	JANELA INICIAL	JANELA FINAL	LATITUDE	LONGITUDE
1	140	RUA COCAIS,300	JD ORIENTAL	SAO PAULO	SP	04347170	65,8	29/11/10	77	08:00	18:00	-23,642671	-46,649939
2	146	CRISTIANO VIANA,450	CERQUEIRA CESAR	SAO PAULO	SP	05411000	6,5	29/11/10	24	08:00	18:00	-23,558754	-46,677377
3	145	RUA DAS GRUMIXAMAS,1040	JABAQUARA	SAO PAULO	SP	04349180	230,1	29/11/10	105	08:00	15:00	-23,649556	-46,650145
4	141	AV DOS IMARES,391	INDIANOPOLIS	SAO PAULO	SP	04085000	235,1	29/11/10	75	08:00	17:00	-23,612384	-46,666074
5	139	VERGUEIRO,2016	VILA MARIANA	SAO PAULO	SP	04102000	33,3	29/11/10	30	08:00	18:00	-23,579828	-46,639486
6	143	LOEFGREN,1235	VILA CLEMENTINO	SAO PAULO	SP	04040031	20,8	29/11/10	25	08:00	18:00	-23,599671	-46,63769
7	155	ESTR CAPUAVA DO,269	JD R COTIA	COTIA	SP	06715725	90,0	29/11/10	25	08:00	17:00	-23,599528	-46,859447
8	156	RUA ROQUE GONZALES,128	JD BRANCA FLOR	ITAPECERICA SERRA	SP	06855690	857,8	29/11/10	71	08:00	16:45	-23,688993	-46,822441

9	154	PEDRO ALEXANDRINO SOARES,287	JARDIM BOA VISTA	SAO PAULO	SP 05584010	4,5	29/11/10	10	08:00	18:00	-23,58204	-46,791014
10	150	RUA SANTA MONICA,980	PARQUE INDUSTRIAL	COTIA	SP 06715865	15,6	29/11/10	60	08:00	15:00	-23,602388	-46,83296
11	151	ROD RAPOSO TAVARES,2833	BARRO BRANCO	COTIA	SP 06705030	2,0	29/11/10	13	08:00	18:30	-23,60021	-46,901665
12	153	RUA GUILHERME DE ALMEIDA,187	NOVO HORIZONTE II	TABOAO DA SERRA	SP 06787440	127,8	29/11/10	17	08:00	18:00	-23,618059	-46,796618
13	157	RUA GIUSEPE CRESPI,76	JD STA EMILIA	SAO PAULO	SP 04183080	1,6	29/11/10	3	08:00	18:00	-23,642583	-46,595252
14	159	AV PIRAPORINHA,777	PLANALTO	S. BER. CAMPO	SP 09891001	4,0	29/11/10	4	08:00	17:30	-23,691495	-46,583844
15	162	FAUSTO,182	VL M VELHO	SAO PAULO	SP 04285080	1,5	29/11/10	40	08:00	16:30	-23,611311	-46,60359
16	164	AV LUIS MERENDA,597	JD DAS NOÇÕES	DIADEMA	SP 09992110	1,0	29/11/10	10	08:00	21:00	-23,637429	-46,647167
17	160	AV JOSE BONIFACIO,1667	SERRARIA	DIADEMA	SP 09961020	6681,9	29/11/10	255	08:00	15:00	-23,707584	-46,609169
18	136	AV AMANCIO GAIOLLI,50	BONSUCESSO	GUARULHOS	SP 07251250	49,2	29/11/10	34	08:00	21:00	-23,423801	-46,395575
19	135	RUA CAMPOS SALES,125	CID JARDIM CUMBICA	GUARULHOS	SP 07180060	79,2	29/11/10	9	08:00	20:00	-23,454369	-46,48267
20	134	AV MENDES DA ROCHA,1093	JD BRASIL	SAO PAULO	SP 02227000	974,3	29/11/10	20	08:00	15:00	-23,478622	-46,573048
21	133	RUA ANTONIO LOBO,95/103	PENHA	SAO PAULO	SP 03634030	870,0	29/11/10	10	08:00	20:00	-23,524453	-46,546054
22	2	RUA SAO QUIRINO,1090	VL GUILHERME	SAO PAULO	SP 02056070	1627,8	29/11/10	65	08:00	18:00	-23,515598	-46,595603
23	137	RUA CAMPOS SALES,125	CUMBICA	GUARULHOS	SP 07180060	90,0	29/11/10	15	08:00	16:00	-23,454369	-46,48267
24	180	RUA JOAO MOREIRA SALLES,130	JD MONTE BELO	SAO PAULO	SP 04344902	14,0	29/11/10	10	08:00	18:00	-23,58887	-46,77471
25	179	PASSAROS E FLORES,466	BROOKLIN PAULISTA	SAO PAULO	SP 04704000	5,7	29/11/10	14	08:00	17:00	-23,622426	-46,690205
26	178	RUA OCTALLES MARCONDES FERREIRA,330 A	JURUBATUBA	SAO PAULO	SP 04696010	92,8	29/11/10	210	08:00	17:30	-23,614184	-46,69353
27	177	RUA JOAO BERTACCHI,61	JARDIM CRISTAL	SAO PAULO	SP 04777110	1,8	29/11/10	19	08:00	17:30	-23,695211	-46,696813
28	176	AV MORUMBI,8435	SANTO AMARO	SAO PAULO	SP 04703004	2,5	29/11/10	70	08:00	17:00	-23,621393	-46,689213
29	175	AV INTERLAGOS,3493	JD UMUARAMA	SAO PAULO	SP 04661200	4,0	29/11/10	18	08:00	19:00	-23,681614	-46,688925
30	174	RUA R CENTRO AFRICANA,219	VAR BAIXO	SAO PAULO	SP 04730050	36,2	29/11/10	28	08:00	18:00	-23,643483	-46,723322

31	188	RUA CONEGO VICENTE MIGUEL MARINO,220	B FUNDA	SAO PAULO	SP 01135020	292,0	29/11/10	19	08:00	17:45	-23,526874	-46,649936
32	184	AV FRANCISCO MATARAZZO,	SHOP WEST PLAZA	SAO PAULO	SP 01238000	8,8	29/11/10	30	08:00	18:00	-23,527463	-46,671818
33	185	RUA ARTUR DE AZEVEDO,772	CERQUEIRA CESAR	SAO PAULO	SP 05404001	58,8	29/11/10	60	08:00	13:00	-23,561209	-46,679342
34	187	RUA TITO,1021	VL ROMANA	SAO PAULO	SP 05051001	4,6	29/11/10	8	08:00	17:30	-23,528243	-46,701803
35	192	RUA BARAO DE CAMPINAS,305	C ELISEOS	SAO PAULO	SP 01201001	218,7	29/11/10	25	08:00	17:00	-23,537891	-46,645959
36	193	BRIGADEIRO LUIS ANTONIO BLMONI,1910	BELA VISTA	SAO PAULO	SP 01318002	30,0	29/11/10	10	08:00	18:00	-23,548943	-46,638818
37	183	AV BARAO DE JUI,89	LIBERDADE	SAO PAULO	SP 01502001	5,0	29/11/10	57	08:00	16:30	-23,608756	-46,709179
38	170	RUA IBITIRAMA,1300	VL PRUDENTE	SAO PAULO	SP 03134002	953,9	29/11/10	225	08:00	19:00	-23,589658	-46,582728
39	186	RUA SALESOPOLIS,62	BOM RETIRO	SAO PAULO	SP 01134010	3,0	29/11/10	3	08:00	18:00	-23,519321	-46,652376
40	167	AV PRESIDENTE WILSON,3458	IPIRANGA	SAO PAULO	SP 04220000	796,1	29/11/10	50	08:00	18:00	-23,5831	-46,597392
41	181	RUA JAMES HOLLAND,380	BARRA FUNDA	SAO PAULO	SP 01138000	90,6	29/11/10	4	08:00	18:00	-23,521943	-46,654947
42	173	RUA CRUZ JOBIM,163	VILA CARAO	SAO PAULO	SP 05738355	2,3	29/11/10	8	08:00	19:00	-23,561432	-46,534072
43	166	RUA ELEONORA CINTRA,140	VL R FEIJO	SAO PAULO	SP 03337000	8,1	29/11/10	14	08:00	17:00	-23,553865	-46,563096
44	171	RUA ATILIO PIFFER,745	C VERDE	SAO PAULO	SP 02516000	20,0	29/11/10	10	08:00	17:00	-23,50761	-46,659311
45	172	RUA ITAPIRA,144	MOOCA	SAO PAULO	SP 03102060	8,1	29/11/10	10	08:00	18:00	-23,553494	-46,621896
46	169	RUA IBITIRAMA,1300	VL PRUDENTE	SAO PAULO	SP 03134002	1793,6	29/11/10	20	08:00	22:00	-23,589658	-46,582728
47	168	RUA IBITIRAMA,1300	VL PRUDENTE	SAO PAULO	SP 03134002	18,9	29/11/10	20	08:00	22:00	-23,589658	-46,582728
48	182	AV BRIGADEIRO LUIZ ANTONIO,2504	BROOKLIN PAULISTA	SAO PAULO	SP 04623110	1,0	29/11/10	1	08:00	20:00	-23,56912	-46,650395
49	195	RUA ATILIO PIFFER,745	C VERDE	SAO PAULO	SP 02516000	95,1	29/11/10	79	08:00	17:00	-23,50761	-46,659311
50	196	RUA FRANCISCO PEDRO DO AMARAL,250	JAGUARE	SAO PAULO	SP 05334110	1,0	29/11/10	11	08:00	18:00	-23,549126	-46,746441
51	199	RUA OLIVIA GUEDES PENTEADO,941	SOCORRO	SAO PAULO	SP 04766001	2451,0	30/11/10	115	08:00	18:00	-23,678817	-46,706722
52	237	MARCELINO BRESSIANI,535	JARDIM MARCELINO	CAIEIRAS	SP 07700000	1,0	30/11/10	6	08:00	17:00	-23,364522	-46,740323
53	238	AV DAURI GOES DE MORAES,380	VILA MIRAVAL II	CAIEIRAS	SP 07700000	1,0	30/11/10	7	08:00	16:00	-23,35384	-46,753806
54	245	RUA MARCELINO BRESSIANI,535	JD MARCELINO	CAIEIRAS	SP 07700000	417,7	30/11/10	28	08:00	16:00	-23,364522	-46,740323

55	242	AV DOS AUTONOMISTAS,1496	VILA CAMPESINA	OSASCO	SP 06020902	62,8	30/11/10	60	07:45	16:00	-23,54074	-46,767845
56	241	AV LOURENCO BELLOLI,1429	PRQ I MAZZEI	OSASCO	SP 06268110	1,0	30/11/10	5	08:00	13:30	-23,497725	-46,775029
57	240	RUA ANTONIO FRANCISCO LEME,139	VILA GERTRUDES	CAIEIRAS	SP 07700000	1,0	30/11/10	2	08:00	16:00	-23,364522	-46,740323
58	236	AV LOURENCO BELLOLI,1429	PRQ I MAZZEI	OSASCO	SP 06268110	16,8	30/11/10	40	07:00	17:00	-23,497725	-46,775029
59	239	AV DOS AUTONOMISTAS,1496	VILA CAMPESINA	OSASCO	SP 06020902	1013,9	30/11/10	114	08:00	16:00	-23,54074	-46,767845
60	251	RUA ANTONIO LOBO,95/103	PENHA	SAO PAULO	SP 03634030	58,8	30/11/10	20	08:00	17:00	-23,524453	-46,546054
61	252	AV PRESIDENTE WILSON,3458	IPIRANGA	SAO PAULO	SP 04220000	1243,9	30/11/10	30	08:00	17:30	-23,5831	-46,597392
62	249	RUA VISCONDE DE INHOMIRIM,950	MOOCA	SAO PAULO	SP 03120001	78,0	30/11/10	84	08:00	18:00	-23,561868	-46,596609
63	248	RUA IBITIRAMA,1300	VL PRUDENTE	SAO PAULO	SP 03134002	129,3	30/11/10	149	08:00	17:00	-23,589658	-46,582728
64	247	RUA CORONEL RODOVALHO,290	PENHA DE FRANCA	SAO PAULO	SP 03632000	27,3	30/11/10	29	08:00	17:00	-23,527521	-46,550946
65	246	RUA IBITIRAMA,1300	VL PRUDENTE	SAO PAULO	SP 03134002	12,9	30/11/10	120	08:00	22:00	-23,589658	-46,582728
66	255	RUA MARCOS MELEGA,55	ALTO PINHEIROS	SAO PAULO	SP 05466010	15,5	30/11/10	12	08:00	17:00	-23,550876	-46,719184
67	253	RUA ALCIDES LOURENÇO DA ROCHA,167	BROOKLIN NOVO	SAO PAULO	SP 04571110	75,5	30/11/10	69	08:00	18:00	-23,603365	-46,694078
68	256	TABAPUA,41	ITAIM BIBI	SAO PAULO	SP 04533010	3,0	30/11/10	52	08:00	17:00	-23,581684	-46,670551
69	254	AV DOS IMARES,391	INDIANOPOLIS	SAO PAULO	SP 04085000	436,1	30/11/10	39	08:00	17:00	-23,612384	-46,666074
70	258	RUA COCAIS,300	JD ORIENTAL	SAO PAULO	SP 04347170	91,4	30/11/10	98	08:00	18:00	-23,642671	-46,649939
71	259	AV CORIFEU AZEVEDO MARQUES,3097	BUTANTA	SAO PAULO	SP 05339000	3,1	30/11/10	28	08:00	16:00	-23,569602	-46,741139
72	260	RUA MANUEL MURGUIA,101	VL INGLESA	SAO PAULO	SP 04654000	90,0	30/11/10	17	08:00	18:00	-23,660459	-46,675615
73	261	RUA FLORIDA,1970	CIDADE MONCOES	SAO PAULO	SP 04565001	4,0	30/11/10	22	08:00	17:00	-23,606863	-46,695618
74	262	RUA R CENTRO AFRICANA,219	VAR BAIXO	SAO PAULO	SP 04730050	1102,2	30/11/10	30	08:00	18:00	-23,643483	-46,723322
75	263	PASSAROS E FLORES,466	JD DAS ACACIAS	SAO PAULO	SP 04704000	4,0	30/11/10	7	08:00	17:00	-23,622426	-46,690205
76	235	AV MENDES DA ROCHA,1093	JD BRASIL	SAO PAULO	SP 02227000	1,0	30/11/10	13	08:00	15:00	-23,478622	-46,573048

77	233	RUA RELIQUIA,97	JD DAS LARANJEIRAS	SAO PAULO	SP 02517000	10,0	30/11/10	20	08:00	18:00	-23,511672	-46,662087
78	203	RUA AMAZONAS DA SILVA,323	VILA GUILHERME	SAO PAULO	SP 02051000	85,8	30/11/10	29	08:00	18:00	-23,516433	-46,610966
79	231	RUA CAMPOS SALES,125	CUMBICA	GUARULHOS	SP 07180060	103,0	30/11/10	94	08:00	16:00	-23,454369	-46,48267
80	204	RUA SAO QUIRINO,1090	VL GUILHERME	SAO PAULO	SP 02056070	494,0	30/11/10	70	08:00	18:00	-23,515598	-46,595603
81	201	RUA PREFEITO OLIVIER RAMOS NOGUEIRA,575	C I S S PAULO-CUMBICA	GUARULHOS	SP 07222170	1,0	30/11/10	13	08:00	17:00	-23,464187	-46,472393
82	269	RUA TAQUARAL,60	JARDIM ITAPECERICA	ITAPECERICA SERRA	SP 06853400	2,0	30/11/10	26	08:00	18:00	-23,690024	-46,85667
83	268	RUA ROQUE GONZALES,128	JD BRANCA FLOR	ITAPECERICA SERRA	SP 06855690	1427,9	30/11/10	286	08:00	16:45	-23,688993	-46,822441
84	270	RUA RAFAEL DE MARCO,175	PQ IND DAS OLIVEIRAS	TABOAO DA SERRA	SP 06765350	6946,6	30/11/10	191	08:00	17:00	-23,620126	-46,775069
85	266	AV JOSE BONIFACIO,1667	SERRARIA	DIADEMA	SP 09961020	1,0	30/11/10	606	08:00	15:00	-23,707584	-46,609169
86	265	AV LUIS MERENDA,597	JD DAS NOÇÕES	DIADEMA	SP 09992110	1,0	30/11/10	10	08:00	18:00	-23,637429	-46,647167
87	264	RUA GIUSEPE CRESPI,76	JD S EMILIA	SAO PAULO	SP 04183080	1,5	30/11/10	15	08:00	18:00	-23,642583	-46,595252
88	267	RUA GUAICURUS,185	DIADEMA	SAO PAULO	SP 09911630	36,0	30/11/10	28	08:00	17:00	-23,695568	-46,617545
89	275	RUA GUILHERME DE ALMEIDA,187	NOVO HORIZONTE II	TABOAO DA SERRA	SP 06787440	235,3	30/11/10	29	08:00	18:00	-23,618059	-46,796618
90	272	RUA SANTA MONICA,1050	PQ IND SAN JOSE	COTIA	SP 06715865	1,0	30/11/10	47	08:00	17:30	-23,602388	-46,83296
91	273	ROD RAPOSO TAVARES,2833	BARRO BRANCO	COTIA	SP 06705030	1,0	30/11/10	70	08:00	18:30	-23,60021	-46,901665
92	274	SAN JOSE,211	JARDIM BELIZARIO	COTIA	SP 06700000	34,8	30/11/10	41	08:00	17:00	-23,60416	-46,92428
93	271	ROD RAPOSO TAVARES,2833	BARRO BRANCO	COTIA	SP 06705030	1,0	30/11/10	72	08:00	18:30	-23,60021	-46,901665
94	278	RUA ATILIO PIFFER,745	C VERDE	SAO PAULO	SP 02516000	34,1	30/11/10	30	08:00	17:00	-23,50761	-46,659311
95	276	RUA SAO FELIPE,737	PRQ S JORGE	SAO PAULO	SP 03085010	3853,5	30/11/10	112	08:00	15:30	-23,52833	-46,570473
96	277	RUA FRANCISCO PEDRO DO AMARAL,250	JAGUARE	SAO PAULO	SP 05334110	1,0	30/11/10	50	08:00	18:00	-23,549126	-46,746441
97	287	RUA SABARA,566	CONSOLACAO	SAO PAULO	SP 01303050	4,5	01/12/10	16	08:00	18:00	-23,548702	-46,655704
98	283	RUA JAMES HOLLAND,380	BARRA FUNDA	SAO PAULO	SP 01138000	1,0	01/12/10	5	08:00	18:00	-23,521943	-46,654947
99	284	JOAQUIM EUGENIO DE LIMA,383	BELA VISTA	SAO PAULO	SP 01403001	0,9	01/12/10	93	08:00	16:00	-23,565366	-46,649938

100	285	RUA CONEGO VICENTE MIGUEL MARINO,220	B FUNDA	SAO PAULO	SP 01135020	322,2	01/12/10	224	08:00	17:45	-23,526874	-46,649936
101	286	RUA BARAO DE CAMPINAS,305	C ELISEOS	SAO PAULO	SP 01201001	364,2	01/12/10	54	08:00	16:00	-23,537891	-46,645959
102	293	ROD RAPOSO TAVARES,2833	BARRO BRANCO	COTIA	SP 06705030	2,0	01/12/10	102	08:00	18:30	-23,60021	-46,901665
103	291	RUA VALENTIM BITOLO,165	VILA GASPARINI	S. BER. CAMPO	SP 09624030	4,5	01/12/10	13	08:00	18:00	-23,657229	-46,572582
104	290	NOSSA SENHORA DAS GRACAS,115	SERRARIA	DIADEMA	SP 09980000	1,0	01/12/10	22	08:00	16:00	-23,703755	-46,60493
105	288	DOUTOR JOSE FORNARI	VL FERRAZOPOLIS	S. BER. CAMPO	SP 09790400	24,0	01/12/10	11	08:00	17:30	-23,731684	-46,545108
106	289	RUA RENATO DIAS SEGUR,50	NOVA MAUA	MAUA	SP 09390650	4,8	01/12/10	8	08:00	20:00	-23,642034	-46,454572
107	295	AV DOS IMARES,391	INDIANOPOLIS	SAO PAULO	SP 04085000	12,3	01/12/10	14	08:00	17:00	-23,612384	-46,666074
108	296	RUA COCAIS,300	JD ORIENTAL	SAO PAULO	SP 04347170	108,8	01/12/10	110	08:00	18:00	-23,642671	-46,649939
109	297	RUA DR NOGUEIRA MARTINS,209	SAUDE	SAO PAULO	SP 04143020	10,0	01/12/10	16	08:00	18:00	-23,615562	-46,634639
110	298	AV PEDRO BUENO,1828	JABAQUARA	SAO PAULO	SP 04342001	4,2	01/12/10	37	08:00	17:00	-23,638555	-46,658172
111	299	TUA,3	VILA CLEMENTINO	SAO PAULO	SP 04044020	4,5	01/12/10	14	08:00	18:00	-23,601467	-46,642204
112	307	AV DAURI GOES DE MORAES,380	VILA MIRAVAL II	CAIEIRAS	SP 07700000	1,0	01/12/10	24	08:00	16:00	-23,35384	-46,753806
113	301	RUA FRANCISCO PEDRO DO AMARAL,314	JAGUARÉ	SAO PAULO	SP 05334110	15,0	01/12/10	10	08:00	17:00	-23,548598	-46,746083
114	302	AV DOS AUTONOMISTAS,1496	VILA CAMPESINA	OSASCO	SP 06020902	68,0	01/12/10	12	07:45	16:00	-23,54074	-46,767845
115	303	MARCELINO BRESSIANI,535	JARDIM MARCELINO	CAIEIRAS	SP 07700000	160,0	01/12/10	26	08:00	17:00	-23,364522	-46,740323
116	304	RUA MARCELINO BRESSIANI,535	JD MARCELINO	CAIEIRAS	SP 07700000	68,4	01/12/10	26	08:00	16:00	-23,364522	-46,740323
117	305	AV LOURENCO BELLOLI,1429	PRQ I MAZZEI	OSASCO	SP 06268110	93,3	01/12/10	47	08:00	13:30	-23,497725	-46,775029
118	308	RUA ANTONIO FRANCISCO LEME,139	VILA GERTRUDES	CAIEIRAS	SP 07700000	1,0	01/12/10	24	08:00	16:00	-23,364522	-46,740323
119	309	AV LOURENCO BELLOLI,1429	PRQ I MAZZEI	OSASCO	SP 06268110	41,6	01/12/10	30	07:00	17:00	-23,497725	-46,775029
120	306	AV DOS AUTONOMISTAS,1496	VILA CAMPESINA	OSASCO	SP 06020902	1427,2	01/12/10	199	08:00	16:00	-23,54074	-46,767845

121	315	AV PRESIDENTE WILSON,3458	IPIRANGA	SAO PAULO	SP	04220000	530,8	01/12/10	52	08:00	17:30	-23,5831	-46,597392
122	316	RUA IBITIRAMA,1300	VL PRUDENTE	SAO PAULO	SP	03134002	568,0	01/12/10	112	08:00	17:00	-23,589658	-46,582728
123	317	RUA IBITIRAMA,1300	VL PRUDENTE	SAO PAULO	SP	03134002	18,7	01/12/10	30	08:00	22:00	-23,589658	-46,582728
124	318	RUA IBITIRAMA,1300	VL PRUDENTE	SAO PAULO	SP	03134002	270,0	01/12/10	30	08:00	22:00	-23,589658	-46,582728
125	321	RUA ELEONORA CINTRA,140	VL R FEIJO	SAO PAULO	SP	03337000	1,0	01/12/10	17	08:00	17:00	-23,553865	-46,563096
126	322	AV GUPE,10837	JARDIM BELVAL	BARUERI	SP	06422120	100,8	01/12/10	100	08:00	16:45	-23,510087	-46,908865
127	323	AV GUPE,10837	JARDIM BELVAL	BARUERI	SP	06422120	1158,5	01/12/10	100	08:00	16:45	-23,510087	-46,908865
128	324	AV GUPE,10837	JARDIM BELVAL	BARUERI	SP	06422120	1,0	01/12/10	100	08:00	16:45	-23,510087	-46,908865
129	325	ALAM DAS ANEMONAS,165	MORADA DAS FLORES	SANTANA PARNAIBA	SP	06519455	3,8	01/12/10	10	08:00	18:00	-23,444182	-46,918955
130	326	AV GUPE,9791	JD BERVAL	BARUERI	SP	06422120	1241,7	01/12/10	180	08:00	17:30	-23,510087	-46,908865
131	327	ALAM TOCANTINS,630	ALPHAVILLE IND	BARUERI	SP	06455020	80,0	01/12/10	175	08:00	19:00	-23,511302	-46,876775
132	328	RUA PARTICULAR,83	PQ STA LUZIA	BARUERI	SP	06402180	292,0	01/12/10	37	08:00	18:00	-23,541953	-46,926824
133	331	AV JAGUARE,818	JAGUARE	SAO PAULO	SP	05346000	65,7	01/12/10	50	08:00	18:00	-23,553096	-46,742261
134	332	RUA OSASCO,949	CENTRO	CAJAMAR	SP	07750000	785,7	01/12/10	216	08:00	18:00	-23,329687	-46,920201
135	336	RUA ROQUE GONZALES,128	JD BRANCA FLOR	ITAPECERICA SERRA	SP	06855690	4,5	01/12/10	76	08:00	16:45	-23,688993	-46,822441
136	334	RUA GUILHERME DE ALMEIDA,187	NOVO HORIZONTE II	TABOAO DA SERRA	SP	06787440	201,0	01/12/10	65	08:00	18:00	-23,618059	-46,796618
137	345	RUA ANTONIO FRANCISCO LEME,139	VILA GERTRUDES	CAIEIRAS	SP	07700000	1,0	02/12/10	3	08:00	16:00	-23,364522	-46,740323
138	353	MARCELINO BRESSIANI,535	JARDIM MARCELINO	CAIEIRAS	SP	07700000	1,0	02/12/10	19	08:00	17:00	-23,364522	-46,740323
139	352	RUA AMERICO VESPUCIO,85	JARDIM PLATINA	OSASCO	SP	06273070	93,0	02/12/10	33	08:00	17:30	-23,497986	-46,768626
140	349	AV DOS AUTONOMISTAS,1496	VILA CAMPESINA	OSASCO	SP	06020902	321,0	02/12/10	37	08:00	16:00	-23,54074	-46,767845
141	346	RUA MARCELINO BRESSIANI,535	JD MARCELINO	CAIEIRAS	SP	07700000	420,0	02/12/10	28	08:00	16:00	-23,364522	-46,740323
142	344	AV DAURI GOES DE MORAES,380	VILA MIRAVAL II	CAIEIRAS	SP	07700000	1,0	02/12/10	3	08:00	16:00	-23,35384	-46,753806
143	343	AV LOURENCO BELLOLI,1429	PRQ I MAZZEI	OSASCO	SP	06268110	11,8	02/12/10	60	07:00	17:00	-23,497725	-46,775029
144	342	RUA FRANCISCO PEDRO DO AMARAL,314	JAGUARÉ	SAO PAULO	SP	05334110	48,9	02/12/10	12	08:00	17:00	-23,548598	-46,746083
145	341	ROBERTO PINTO SOBRINHO,121	PARQUE INDUSTRIAL MA	OSASCO	SP	06268120	576,0	02/12/10	27	08:00	16:30	-23,492966	-46,778419

146	348	AV LOURENCO BELLOLI,1429	PRQ I MAZZEI	OSASCO	SP 06268110	302,8	02/12/10	65	08:00	13:30	-23,497725	-46,775029
147	359	MANOEL DA NOBREGA,1015	PARAISO	SAO PAULO	SP 04001084	3,8	02/12/10	115	08:00	17:00	-23,574882	-46,654534
148	356	RUA CLDOMIRO AMAZONAS,889	VL N CONCEICAO	SAO PAULO	SP 04537012	8,8	02/12/10	9	08:00	18:00	-23,592309	-46,677559
149	360	AV DOS IMARES,391	INDIANOPOLIS	SAO PAULO	SP 04085000	2,1	02/12/10	13	08:00	17:00	-23,612384	-46,666074
150	354	RUA FIDALGA,593	PINHEIROS	SAO PAULO	SP 05432070	1,0	02/12/10	25	08:00	17:00	-23,554453	-46,691184
151	355	RUA APENINOS,775	PARAISO	SAO PAULO	SP 04104080	3,2	02/12/10	44	08:00	16:30	-23,574338	-46,639261
152	358	BARRA DO PARATECA,136	VL GUARANI	SAO PAULO	SP 04312000	10,0	02/12/10	10	08:00	17:30	-23,633131	-46,634616
153	357	RUA COCAIS,300	JD ORIENTAL	SAO PAULO	SP 04347170	41,2	02/12/10	68	08:00	18:00	-23,642671	-46,649939
154	372	AV GUPE,9791	JD BERVERAL	BARUERI	SP 06422120	762,4	02/12/10	63	08:00	17:30	-23,510087	-46,908865
155	377	RUA LIZARD,162	C ARISTON	CARAPICUIBA	SP 06395290	4,5	02/12/10	13	08:00	16:00	-23,522653	-46,836805
156	376	AV GUPE,10837	JARDIM BELVAL	BARUERI	SP 06422120	173,4	02/12/10	103	08:00	16:45	-23,510087	-46,908865
157	375	ALAM DAS ANEMONAS,165	MORADA DAS FLORES	SANTANA PARNAIBA	SP 06519455	3,8	02/12/10	21	08:00	18:00	-23,444182	-46,918955
158	373	AV GUPE,10837	JARDIM BELVAL	BARUERI	SP 06422120	259,5	02/12/10	98	08:00	16:45	-23,510087	-46,908865
159	371	AV CECI,238	TAMBORE	BARUERI	SP 06460120	9,3	02/12/10	22	08:00	20:00	-23,497121	-46,827539
160	374	AV GUPE,10837	JARDIM BELVAL	BARUERI	SP 06422120	1,0	02/12/10	97	08:00	16:45	-23,510087	-46,908865
161	369	RUA IPANEMA,207	MOOCA	SAO PAULO	SP 03164200	55,1	02/12/10	9	08:00	16:00	-23,548836	-46,609844
162	370	RUA IBITIRAMA,1300	VL PRUDENTE	SAO PAULO	SP 03134002	127,0	02/12/10	73	08:00	17:00	-23,589658	-46,582728
163	366	AV PRESIDENTE WILSON,3458	IPIRANGA	SAO PAULO	SP 04220000	13,8	02/12/10	38	08:00	17:30	-23,5831	-46,597392
164	365	RUA CANHONEIRA BELMONT,10	VILA GUILHERME	SAO PAULO	SP 02064100	4,5	02/12/10	5	08:00	18:00	-23,515598	-46,595603
165	364	RUA CANHONEIRA BELMONT,10	VILA GUILHERME	SAO PAULO	SP 02064100	1,2	02/12/10	5	08:00	18:00	-23,515598	-46,595603
166	363	RUA OSASCO,949	CENTRO	CAJAMAR	SP 07750000	530,7	02/12/10	119	08:00	18:00	-23,329687	-46,920201
167	362	VIA ANHANGUERA,37	PARQUE EMPRESARIAL	CAJAMAR	SP 07750000	107,8	02/12/10	44	08:00	17:00	-23,417892	-46,866104
168	361	RUA R CENTRO AFRICANA,219	VAR BAIXO	SAO PAULO	SP 04730050	1314,0	02/12/10	119	08:00	14:00	-23,643483	-46,723322
169	368	AV DOUTOR FELIPE PINEL,255	PIRITUBA	SAO PAULO	SP 02939000	4,5	02/12/10	15	08:00	18:00	-23,485634	-46,728145
170	378	AV JOSE BONIFACIO,1667	SERRARIA	DIADEMA	SP 09961020	1597,0	02/12/10	381	08:00	18:00	-23,707584	-46,609169
171	382	RUA DIONISIO PEDRELLINI,268	JARDIM OLYMPIA	SAO PAULO	SP 05542130	1,0	02/12/10	26	08:00	18:00	-23,591003	-46,749513

172	381	RUA RAFAEL DE MARCO,175	PQ IND DAS OLIVEIRAS	TABOAO DA SERRA	SP	06765350	4883,1	02/12/10	224	08:00	17:00	-23,620126	-46,775069
173	380	RUA ROQUE GONZALES,128	JD BRANCA FLOR	ITAPECERICA SERRA	SP	06855690	102,2	02/12/10	123	08:00	16:45	-23,688993	-46,822441
174	396	RUA CONEGO VICENTE MIGUEL MARINO,220	B FUNDA	SAO PAULO	SP	01135020	599,3	02/12/10	40	08:00	17:45	-23,526874	-46,649936
175	395	AV LINS DE VASCONCELOS,757	CAMBUCI	SAO PAULO	SP	01537000	13,3	02/12/10	16	08:00	18:00	-23,570039	-46,622192
176	394	RUA JARAGUA,396	BOM RETIRO	SAO PAULO	SP	01129000	6,1	02/12/10	15	08:00	18:00	-23,522962	-46,64461
177	393	RUA BARAO DE CAMPINAS,305	C ELISEOS	SAO PAULO	SP	01201001	786,0	02/12/10	92	08:00	16:00	-23,537891	-46,645959
178	392	RUA BRIGADEIRO GALVAO,318	BARRA FUNDA	SAO PAULO	SP	01151000	4,5	02/12/10	16	08:00	17:30	-23,532251	-46,655239
179	391	RUA JAMES HOLLAND,380	BARRA FUNDA	SAO PAULO	SP	01138000	1,0	02/12/10	10	08:00	18:00	-23,521943	-46,654947
180	386	ESTR DO CAPUAVA,269	BAIRRO BRANCO	COTIA	SP	06715725	110,0	02/12/10	27	08:00	16:30	-23,599528	-46,859447
181	390	RUA GUILHERME DE ALMEIDA,187	NOVO HORIZONTE II	TABOAO DA SERRA	SP	06787440	1,0	02/12/10	65	08:00	18:00	-23,618059	-46,796618
182	387	RUA ARABIA,181	PARQUE INDUSTRIAL DACI	TABOAO DA SERRA	SP	06785410	230,2	02/12/10	24	08:00	17:30	-23,632974	-46,807715
183	388	ROD RAPOSO TAVARES,2833	BARRO BRANCO	COTIA	SP	06705030	2,0	02/12/10	25	08:00	18:30	-23,60021	-46,901665
184	385	RUA JOAO MOREIRA SALLES,130	JD MONTE BELO	SAO PAULO	SP	04344902	14,0	02/12/10	67	08:00	18:00	-23,58887	-46,77471
185	384	RUA JOSE SILVANO FILHO,116	BUTANTA	SAO PAULO	SP	05545160	517,0	02/12/10	26	08:00	18:00	-23,584768	-46,768095
186	383	AV PORTUGAL,1100	NOVA SAO PAULO	SAO PAULO	SP	06696060	273,0	02/12/10	20	08:00	17:00	-23,617549	-46,684259
187	397	RUA SANTO EURILO,296	JAGUARE	SAO PAULO	SP	05345040	15,9	02/12/10	20	08:00	17:00	-23,554493	-46,742449
188	398	RUA PARTICULAR,83	ITAQUI	BARUERI	SP	06402180	356,0	02/12/10	12	08:00	18:00	-23,541953	-46,926824
189	399	AV PORTUGAL,1100	NOVA SAO PAULO	SAO PAULO	SP	06696060	1337,7	02/12/10	74	08:00	17:00	-23,617549	-46,684259
190	437	AV DOS IMARES,391	INDIANOPOLIS	SAO PAULO	SP	04085000	1,0	03/12/10	5	08:00	17:00	-23,612384	-46,666074
191	440	RUA MAJOR FREIRE,594	VILA MONTE ALEGRE	SAO PAULO	SP	04304110	4,5	03/12/10	14	08:00	17:00	-23,627888	-46,635044
192	441	RUA COCAIS,300	JD ORIENTAL	SAO PAULO	SP	04347170	90,2	03/12/10	126	08:00	18:00	-23,642671	-46,649939
193	439	RUA ONZE DE FEVEREIRO,187	CID VARGAS	SAO PAULO	SP	04319020	524,4	03/12/10	74	08:00	18:00	-23,646112	-46,637746
194	438	CASA DO AUTOR,650	VILA OLIMPIA	SAO PAULO	SP	04547002	9,9	03/12/10	11	08:00	17:30	-23,59843	-46,679802

195	460	RUA PROFESSOR RUBIAO MEIRA,50	VL WASHINGTON	S. BER. CAMPO	SP 09890430	22,5	03/12/10	30	08:00	18:00	-23,693604	-46,56797
196	459	RUA DINO BUENO,16	VILA SCARPELLI	SANTO ANDRE	SP 09050440	4,5	03/12/10	20	08:00	19:00	-23,675901	-46,544403
197	458	RUA RONDONIA,186	JD. MARIA TERESA	COTIA	SP 06703710	941,4	03/12/10	40	07:45	17:45	-23,6001	-46,907525
198	457	ROD RAPOSO TAVARES,S/N	JD SABIA	COTIA	SP 06703030	24,9	03/12/10	40	08:00	16:30	-23,590408	-46,81366
199	454	ROD RAPOSO TAVARES,2833	BARRO BRANCO	COTIA	SP 06705030	2,0	03/12/10	125	08:00	18:30	-23,60021	-46,901665
200	452	ESTR DO CAPUAVA,269	BAIRRO BRANCO	COTIA	SP 06715725	30,0	03/12/10	19	08:00	16:30	-23,599528	-46,859447
201	453	RUA EURICLIDES FORMIGA,10/30	JD CLAUDIO	COTIA	SP 06714300	228,0	03/12/10	45	08:00	18:00	-23,599391	-46,879832
202	451	RUA GUILHERME DE ALMEIDA,187	NOVO HORIZONTE II	TABOAO DA SERRA	SP 06787440	721,2	03/12/10	45	08:00	18:00	-23,618059	-46,796618
203	435	VIA ANHANGUERA,37	PARQUE EMPRESARIAL	CAJAMAR	SP 07750000	107,8	03/12/10	32	08:00	17:00	-23,417892	-46,866104
204	434	RUA OSASCO,949	CENTRO	CAJAMAR	SP 07750000	712,9	03/12/10	171	08:00	18:00	-23,329687	-46,920201
205	461	RUA VALENTIM BITOLO,165	VILA GASPARINI	S. BER. CAMPO	SP 09624030	4,5	03/12/10	5	08:00	18:00	-23,657229	-46,572582
206	463	AV JOSE BONIFACIO,1667	SERRARIA	DIADEMA	SP 09961020	1,0	03/12/10	160	08:00	17:00	-23,707584	-46,609169
207	436	RUA HERISON,201	LAUZANE PALISTA	SAO PAULO	SP 02442040	1592,4	03/12/10	40	08:00	18:00	-23,472964	-46,64393
208	448	RUA IBITIRAMA,1300	VL PRUDENTE	SAO PAULO	SP 03134002	9,0	03/12/10	50	08:00	22:00	-23,589658	-46,582728
209	464	RUA RAFAEL DE MARCO,175	PQ IND DAS OLIVEIRAS	TABOAO DA SERRA	SP 06765350	877,7	03/12/10	68	08:00	17:00	-23,620126	-46,775069
210	465	AV JOAO PAULO I,555	JARDIM DAS OLIV	EMBU	SP 06818902	14,9	03/12/10	15	08:00	17:00	-23,636457	-46,822971
211	466	RUA ROQUE GONZALES,128	JD BRANCA FLOR	ITAPECERICA SERRA	SP 06855690	1,0	03/12/10	124	08:00	16:45	-23,688993	-46,822441
212	447	RUA MARECHAL BARBACENA,1204	VILA REGENTE FEIJO	SAO PAULO	SP 03333000	4,5	03/12/10	18	08:00	18:00	-23,555926	-46,568363
213	446	RUA ISABEL,90	PENHA	SAO PAULO	SP 03647020	4,5	03/12/10	14	08:00	18:00	-23,522253	-46,52778
214	445	RUA TUITI,606	TATUAPE	SAO PAULO	SP 03081015	9,0	03/12/10	20	08:00	18:00	-23,531594	-46,575682
215	444	RIBEIROPOLIS,71	VILA CHARLOTE	SAO PAULO	SP 03275170	1,0	03/12/10	146	08:00	18:00	-23,579927	-46,553326
216	443	RUA IBITIRAMA,1300	VL PRUDENTE	SAO PAULO	SP 03134002	475,9	03/12/10	70	08:00	18:30	-23,589658	-46,582728
217	442	AV PRESIDENTE WILSON,3458	IPIRANGA	SAO PAULO	SP 04220000	122,6	03/12/10	26	08:00	17:30	-23,5831	-46,597392
218	449	RUA IBITIRAMA,1300	VL PRUDENTE	SAO PAULO	SP 03134002	1834,8	03/12/10	50	08:00	22:00	-23,589658	-46,582728
219	450	RUA IBITIRAMA,1300	VL PRUDENTE	SAO PAULO	SP 03134002	8,2	03/12/10	50	08:00	22:00	-23,589658	-46,582728
220	467	RUA CEL CONRADO SIQUEIRA CAMPOS,47	JARDIM DAS ACACIAS	SAO PAULO	SP 04704140	5,5	03/12/10	21	08:00	18:00	-23,62334	-46,686913

221	475	RUA MARTINS,168	BUTANTA	SAO PAULO	SP 05511000	2,0	03/12/10	12	08:00	18:00	-23,574032	-46,708712
222	474	MARGINAL,1341	SANTO AMARO	SAO PAULO	SP 06708030	2,0	03/12/10	70	08:00	17:00	-23,634199	-46,716015
223	473	RUA CANCIONEIRO DE EVORA,717	SANTO AMARO	SAO PAULO	SP 04708010	9,6	03/12/10	15	08:00	18:00	-23,632524	-46,694854
224	472	RUA JOAO ALFREDO,353	SANTO AMARO	SAO PAULO	SP 01000000	2,0	03/12/10	12	08:00	14:00	-23,658445	-46,702848
225	470	RUA R CENTRO AFRICANA,219	VAR BAIXO	SAO PAULO	SP 04730050	15,8	03/12/10	17	08:00	18:00	-23,643483	-46,723322
226	469	RUA OCTALLES MARCONDES FERREIRA,330 A	JURUBATUBA	SAO PAULO	SP 04696010	682,3	03/12/10	155	08:00	17:30	-23,499964	-46,792516
227	468	AV JOAO DIAS,1242 A	S AMARO	SAO PAULO	SP 04724001	44,1	03/12/10	15	08:00	18:00	-23,645364	-46,712327
228	401	RUA CAMPOS SALES,125	CUMBICA	GUARULHOS	SP 07180060	131,1	03/12/10	225	08:00	16:00	-23,454369	-46,48267
229	402	AV MENDES DA ROCHA,1093	JD BRASIL	SAO PAULO	SP 02227000	1886,0	03/12/10	131	08:00	15:00	-23,478622	-46,573048
230	403	RUA SAO QUIRINO,1090	VL GUILHERME	SAO PAULO	SP 02056070	514,0	03/12/10	80	08:00	18:00	-23,515598	-46,595603
231	432	RUA MONSENHOR ANTONIO J TAVORA,44	TREMEMBE	SAO PAULO	SP 02372110	1,0	03/12/10	90	08:00	18:00	-23,459212	-46,624724
232	476	ALAM IMARES,456	ALPHAVILLE	SANTANA PARNAIBA	SP 06540040	1,0	03/12/10	30	08:00	17:00	-23,444182	-46,918955
233	477	ALAM TOCANTINS,630	ALPHAVILLE IND	BARUERI	SP 06455020	79,5	03/12/10	15	08:00	17:00	-23,511302	-46,876775
234	478	ALAM DAS SEMPRE VIVAS,659	ALPHAVILLE	SANTANA PARNAIBA	SP 06539170	4,5	03/12/10	38	08:00	18:00	-23,444182	-46,918955
235	479	RUA FRANCISCO PEDRO DO AMARAL,250	JAGUARE	SAO PAULO	SP 05334110	182,7	03/12/10	59	08:00	18:00	-23,549126	-46,746441
236	480	RUA SANTO EURILO,296	JAGUARE	SAO PAULO	SP 05345040	19,5	03/12/10	9	08:00	17:00	-23,554493	-46,742449

2 – Dados das coletas dinâmicas

Os dados aqui expostos referem-se às coletas dinâmicas que surgiram ao longo dos dias de análise.

	ID	ENDEREÇO	BAIRRO	CIDADE	UF	CEP	PESO	DATA	TEMPO PARADA	JANELA INICIAL	JANELA FINAL	LATITUDE	LONGITUDE
1	144	TABAPUA,41	ITAIM BIBI	SAO PAULO	SP	04533010	10,0	29/11/10	10	08:00	18:00	-23,581684	-46,670551
2	161	RUA MARINHO DE CARVALHO,101	VL MARINA	DIADEMA	SP	09921005	619,5	29/11/10	65	08:00	20:00	-23,682987	-46,618479
3	163	AV SETE SETEMBRO,1270	JD RECANTO	DIADEMA	SP	09912010	100,0	29/11/10	25	08:00	18:00	-23,68768	-46,611516
4	159	PIRAPORINHA,777	PLANALTO	S. BERN. CAMPO	SP	09891001	5,0	29/11/10	50	08:00	17:00	-23,691495	-46,583844
5	250	RUA REFINARIA MATARIPE,249	VL ANTONIETA	SAO PAULO	SP	03477010	75,1	30/11/10	21	08:00	17:30	-23,568608	-46,513934
6	257	RUA ONZE DE FEVEREIRO,187	CID VARGAS	SAO PAULO	SP	04319020	695,1	30/11/10	49	08:00	18:00	-23,646112	-46,637746
7	202	ROD PRES DUTRA	BONSUCESSO	GUARULHOS	SP	07034000	51,5	30/11/10	34	08:00	16:00	-23,41655	-46,40548
8	279	RUA RELIQUIA,97	JD LARANJEIRAS	SAO PAULO	SP	02517000	310,0	30/11/10	77	08:00	18:00	-23,511672	-46,662087
9	292	AV SETE SETEMBRO,1270	JD RECANTO	DIADEMA	SP	09912010	17,0	01/12/10	5	08:00	18:00	-23,68768	-46,611516
10	300	AV SANTA CATARINA PAVIMENTO TE,935	VL MASCOTE	SAO PAULO	SP	04378300	2,1	01/12/10	25	08:00	17:00	-23,548943	-46,638818
11	320	RUA REFINARIA MATARIPE,249	VL ANTONIETA	SAO PAULO	SP	03477010	43,5	01/12/10	89	08:00	17:30	-23,568608	-46,513934
12	319	RUA ELEONORA CINTRA,140	VL R FEIJO	SAO PAULO	SP	03337000	1,6	01/12/10	15	08:00	17:00	-23,553865	-46,563096
13	335	RUA OCTALLES MARCONDES FERREIRA,330 A	JURUBATUBA	SAO PAULO	SP	04696010	296,7	01/12/10	183	08:00	20:00	-23,499964	-46,792516
14	347	RUA SANDOVAL FERREIRA CABRAL,325	JD SANTO ELIAS	SAO PAULO	SP	05135330	21,4	02/12/10	15	08:00	17:30	-23,496892	-46,747786
15	367	RUA REFINARIA MATARIPE,249	VL ANTONIETA	SAO PAULO	SP	03477010	428,8	02/12/10	34	08:00	17:30	-23,568608	-46,513934
16	456	RUA AGENOR DE LIMA FRANCO,55	JD PERI PERI	SAO PAULO	SP	05537120	41,0	03/12/10	95	08:00	17:00	-23,584182	-46,734422
17	462	AV SETE SETEMBRO,1270	JD RECANTO	DIADEMA	SP	09912010	52,3	03/12/10	25	08:00	18:00	-23,68768	-46,611516
18	471	RUA DOS INOCENTES,870	SOCORRO	SAO PAULO	SP	04764050	1,0	03/12/10	20	08:00	17:00	-23,674374	-46,708948

19	481	AV JAGUARE,818	JAGUARE	SAO PAULO	SP	05346000	406,2	03/12/10	11	08:00	17:00	-23,553096	-46,742261
----	-----	----------------	---------	-----------	----	----------	-------	----------	----	-------	-------	------------	------------

A seguir são mostradas para cada uma das coletas dinâmicas, a data e hora de sua solicitação, a data e hora do atendimento real praticado pela empresa e a diferença em minutos destes tempos.

	ID	Data Hora Solicitação	Data Hora Atendimento	Tempo Atendimento
1	144	29/11/10 08:56	29/11/10 16:00	424
2	161	29/11/10 11:12	29/11/10 13:10	118
3	163	29/11/10 10:47	29/11/10 16:00	313
4	159	29/11/10 10:21	29/11/10 12:10	109
5	250	30/11/10 11:02	30/11/10 14:38	216
6	257	30/11/10 10:38	30/11/10 13:11	153
7	202	30/11/10 10:53	30/11/10 14:38	225
8	279	30/11/10 12:36	30/11/10 15:43	187
9	292	01/12/10 10:10	01/12/10 14:45	275
10	300	01/12/10 11:20	01/12/10 15:10	230
11	320	01/12/10 10:27	01/12/10 12:05	98
12	319	01/12/10 11:31	01/12/10 12:20	49
13	335	01/12/10 15:45	01/12/10 16:59	74
14	347	02/12/10 09:20	02/12/10 12:04	164
15	367	02/12/10 10:34	02/12/10 13:06	152
16	456	03/12/10 10:19	03/12/10 15:30	311
17	462	03/12/10 10:43	03/12/10 17:00	377
18	471	03/12/10 10:28	03/12/10 14:20	232
19	481	03/12/10 11:57	03/12/10 13:12	75

