

António Manuel Coelho Oliveira e Sousa

FORMALIZAÇÕES E ABORDAGENS AO PROBLEMA DE
DISTRIBUIÇÃO E RECOLHA DE PRODUTOS
ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO: REDE SECUNDÁRIA
DA REGIÃO SUL DOS CORREIOS

Mestrado em Ciências Económicas e Empresariais

Unidade de Economia e Administração / Instituto Superior de Economia e Gestão (ISEG)

Universidade do Algarve / Universidade Técnica de Lisboa

Setembro 1995



António Manuel Coelho Oliveira e Sousa

FORMALIZAÇÕES E ABORDAGENS AO PROBLEMA DE
DISTRIBUIÇÃO E RECOLHA DE PRODUTOS
ESTUDO DE UM CASO PRÁTICO: REDE SECUNDÁRIA
DA REGIÃO SUL DOS CORREIOS

Dissertação para a obtenção do grau de
mestre em Ciências Económicas e
Empresariais

Orientadores:

Prof. Doutor Adriano Pimpão

Dr^a Gabriela Schütz

Mestrado em Ciências Económicas e Empresariais

Unidade de Economia e Administração / Instituto Superior de Economia e Gestão (ISEG)

Universidade do Algarve / Universidade Técnica de Lisboa

Setembro 1995

UNIVERSIDADE DO ALGARVE
SERVIÇO DE DOCUMENTAÇÃO

24 08 100 32157

626.8
506.1.1.1

À Filomena, à Joana e ao João

A realização deste trabalho não teria sido possível sem o estímulo e apoio do Professor Doutor Adriano Pimpão e da Dr^a Gabriela Schütz, orientadores desta dissertação. Agradeço também à Dr^a Gabriela Schütz a indicação do tema, sugestões e a cedência de bibliografia e dos programas informáticos de sua autoria.

Agradeço ainda ao Sr. Eng. Luís Andrade, Director Regional de Correios do Algarve, a imediata disponibilização de todos os elementos solicitados e a atenção dispensada.

RESUMO

Os custos relativos à entrega e recolha de produtos constituem uma parcela importante do orçamento global da generalidade das Empresas distribuidoras, podendo, por isso, considerar-se que a Optimização das Rotas dos veículos que executam a distribuição é um factor decisivo na competitividade das mesmas.

Na primeira parte do presente trabalho realiza-se uma revisão bibliográfica dos métodos mais utilizados na resolução do Problema de Optimização de Rotas de Veículos clássico (PORV) e também da extensão que envolve Restrições Temporais nos Clientes, os quais consistem, sucintamente, em servir um conjunto de clientes com uma frota de veículos que parte de um depósito central - sendo conhecidas todas as localizações, as procuras dos clientes, as capacidades de carga dos veículos e os intervalos de tempo em que cada cliente pode ser servido (caso existam) - de modo a minimizar os Custos Totais.

Numa segunda parte é efectuado o estudo do problema real designado por Rede Secundária de Distribuição Postal da Região Sul dos Correios, através da utilização de metodologias de optimização de rotas de veículos que consideram, simultaneamente, os aspectos *espaciais* e *temporais* ("Janelas de Tempo" nos clientes a servir) do problema. Realiza-se ainda uma análise comparativa entre os resultados obtidos por aqueles métodos e as actuais soluções adoptadas pela Empresa.

Por último, são feitas considerações sobre as interacções entre as Redes Primária e Secundária de Distribuição dos Correios e referidas algumas alternativas de desenvolvimento futuro.

PALAVRAS CHAVE: *Optimização, Rotas de Veículos, Janelas de Tempo, Distribuição e Recolha de Correio.*

ABSTRACT

The costs related to the pickup and delivery of the products constitute an important item in the global budget of most Companies in charge of distribution. For that reason we can consider the routes optimization a decisive factor in the performance and survival of those firms.

The first part of this work surveys the most used methods in the resolution of both Vehicle Routing Problem (VRP) and VRP with Time Windows which consists, briefly, in service a number of clients with a fleet that starts at the Central Depot - knowing all locations, the clients demands, the vehicles capacities and the time windows each client can be served (if existing) - to minimize the Total Costs.

The second part studies the Secondary Southern Postal Delivery Network, through the use of methodologies of routes optimization which consider simultaneously the spatial and temporal aspects of the case. Also is done a comparative analysis of the results and the actual solutions adopted by the Postal Corp.

Lastly, considerations are made about the interactions between the Primary and Secondary Networks, and also presented some alternatives of future development.

KEY WORDS: *Optimization, Vehicle Routing, Time Windows, Delivery and Pickup of the mail*

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DE OPTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE VEÍCULOS	3
2.1 DESCRIÇÃO	3
2.2 APLICAÇÕES	4
2.3 RESTRIÇÕES ADICIONAIS E EXTENSÕES	5
2.4 COMPLEXIDADE	9
3. ABORDAGENS E METODOLOGIAS EXISTENTES PARA A RESOLUÇÃO DO PORV	11
3.1 ALGORITMOS EXACTOS	12
3.2 ALGORITMOS HEURÍSTICOS	20
3.3 HEURÍSTICAS PARA A RESOLUÇÃO DO PORV COM RESTRIÇÕES TEMPORAIS NOS CLIENTES	34
3.4 PROCESSAMENTO PARALELO	40
4. APLICAÇÃO PRÁTICA	43
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE TRANSPORTES POSTAIS	43
4.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	44
4.3 TRATAMENTO DOS DADOS	48
4.4 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	64
4.5 RESULTADOS	74
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	113

ANEXOS	116
1 ELEMENTOS DISPONIBILIZADOS PELA DIRECÇÃO REGIONAL DE CORREIOS DO ALGARVE	117
1A TRÁFEGOS MÉDIOS DE CORREIO, TIPOLOGIA E DIMENSÕES	118
1B DOTAÇÃO DE CARTEIROS	121
1C TEMPOS PARA OPERAÇÕES DE TRATAMENTO (COEFICIENTES)	126
1D REDES PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA EXISTENTES	128
2 MAPA RODOVIÁRIO	137
3 FICHEIROS	139
3A ENTRADA	140
3B SAÍDA	143
4 PROCEDIMENTOS E LISTAGENS	148
BIBLIOGRAFIA	167

1. INTRODUÇÃO

O Problema de Optimização de Rotas de Veículos (PORV) consiste em determinar o conjunto de rotas a realizar por uma frota de veículos estacionada num Depósito Central para servir um conjunto de clientes, sendo conhecidas as suas localizações e procuras, bem como a localização do Depósito Central e a capacidade de cada viatura.

A resolução do problema consiste, portanto, na selecção de quais os clientes que serão servidos por cada veículo e na obtenção da configuração das respectivas rotas, para servirem esse grupo de clientes de modo a minimizar a distância total a percorrer.

Uma "variante" a este problema, de grande interesse prático, é o denominado Problema de Optimização de Rotas de Veículos com Restrições Temporais nos Clientes¹ (PORVJT) que consiste num PORV em que existem, para cada cliente, intervalos de tempo pré-definidos durante os quais aqueles devem ser servidos.

Neste caso, a afectação dos clientes aos veículos e a determinação da configuração das rotas são estabelecidas considerando quer a minimização das distâncias a percorrer (analogamente ao PORV) como o cumprimento das "Janelas de Tempo" em cada um dos clientes a servir.

Vários exemplos expressos na literatura ilustram a importância económica da determinação dos percursos a efectuar pelos veículos referindo-se, entre outros, os seguintes:

- Bodin and Berman (1979) indicam que o custo dos transportes escolares do Estado de New York ultrapassou os 150 milhões de dólares (1979) e tem vindo a crescer a uma taxa entre 10% e 15% por ano. Os autores mostram que podem ser obtidas poupanças entre os 5% e 30% através do uso de programas de optimização de rotas.
- Evans and Norback (1985) aplicaram heurísticas para a obtenção das rotas dos veículos de distribuição de uma empresa alimentar (Kraft Inc.) e obtiveram

¹ As Restrições Temporais nos Clientes são também designadas por "Janelas de Tempo"

resultados que indicam um ganho médio de 10,7% nos custos variáveis e a possibilidade de redução dos custos fixos da empresa.

- Outras implementações e respectivas reduções de custos são referidas por Golden and Assad (1986), nomeadamente, diminuição de:
 - 6% a 10% nos custos de operação da Air Products and Chemicals, Inc. (1983);
 - 13% nos custos de transporte da frota de camiões cisterna de distribuição de petróleo da Chevron (1981).
- Osman (1993) refere que a redução dos custos de transporte obtidos pelas diversas aplicações práticas realizadas em grandes empresas, de vários sectores de actividade (Indústrias de petróleo, químicas, alimentares e de bebidas), varia entre 6% e 15%.

Face aos elevados custos de distribuição (ou recolha) de alguns sectores de actividade (por exemplo, distribuição de bens alimentares, bebidas, jornais, correio, recolha de lixo, etc.) constata-se que melhoramentos, mesmo que percentualmente pequenos, nas rotas dos veículos de distribuição têm um "peso" económico relevante.

No *ponto 2* deste trabalho é feita a descrição do Problema de Optimização de Rotas de Veículos (PORV), referindo-se também as Restrições Adicionais e Extensões mais comuns ao Problema, algumas das suas Aplicações Práticas e, por último, a sua Complexidade Computacional. No *ponto 3* realiza-se uma revisão dos Métodos Exactos e Heurísticos mais referidos na literatura para a resolução do PORV, seguindo-se a apresentação de algumas Abordagens e Métodos existentes para a resolução do PORV com "Janelas de Tempo" nos Clientes e, por fim, refere-se a utilização de Processamento Paralelo. No *ponto 4* é referida a Aplicação Prática realizada, que inclui a descrição do Problema da Rede Secundária da Região Sul dos Correios, o Tratamento dos Dados, a Implementação Computacional efectuada e os Resultados obtidos.

Por último, no *ponto 5* são feitas observações sobre a Aplicação Prática e referidas algumas alternativas para a sua resolução.

2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DE OPTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE VEÍCULOS

2.1 DESCRIÇÃO

O Problema de Optimização de Rotas de Veículos (PORV)² para distribuição e recolha de produtos surge como consequência da existência de um conjunto de N clientes a servir, através de uma frota de M veículos baseada num Depósito Central, a partir do qual cada veículo inicia e finaliza a sua rota.

As localizações $[(x_i, y_i), i=1, \dots, N]$ e procura individuais de cada cliente $(q_i, i=1, \dots, N)$, a localização do depósito central (x_0, y_0) e as capacidades de carga de cada veículo $(Q_j, j=1, \dots, M)$ são conhecidas.

A resolução do problema consiste na determinação de quais os clientes que serão servidos por cada veículo e qual a sequência a adoptar dentro de cada rota, de forma a minimizar o custo total.

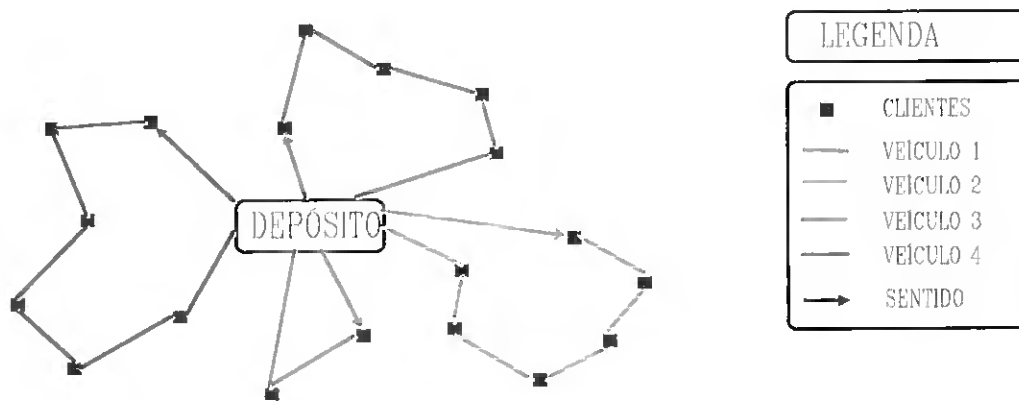


FIGURA 2.1

Considerando a desagregação do custo total em custos fixos (previamente definidos) e variáveis (função das rotas a efectuar), a resolução do PORV consiste na minimização da parcela variável pelo que é indiferente a selecção entre custo total,

²Designado na literatura de língua inglesa por Vehicle Routing Problem, Vehicle Dispatching ou simplesmente Delivery Problem, conforme refere Christofides (1985).

distância total percorrida, tempo total dispendido na realização dos percursos, etc. como função a minimizar no processo de optimização.

2.2 APLICAÇÕES

No mundo actual, a competitividade das empresas de distribuição passa, em grande parte, pela optimização dos seus custos operacionais, pelo que a eficácia e eficiência das rotas de veículos a estabelecer para realizar a distribuição e/ou recolha de produtos (definidos em sentido lato) é um factor chave no desempenho das próprias empresas.

Os exemplos mais frequentes de aplicação de técnicas de optimização aos vários sectores de actividade são referidos na literatura, concretamente:

- Entrega de mercadorias, Evans and Norback (1985), Golden and Wasil (1987), Osman (1993), Semet and Taillard (1993).
- Distribuição de jornais, Nygard et al (1988).
- Distribuição de bebidas refrigerantes, Golden and Wasil (1987).
- Circuitos de recolha de lixo, Beltrami and Bodin (1974), Bodin (1990).
- Rotas de veículos de transporte escolar, Bodin and Berman (1979), Graham and Nuttle (1986), Bodin (1990).
- Distribuição e/ou recolha de correio aos Centros de Distribuição Postal (CDP) numa zona do País (Departamento Postal de Leiria), Rosa e Porta Nova (1993).
- Estabelecimento de percursos da frota de autocarros da Rodoviária Nacional e determinação do seu quantitativo e tipologia, Eusébio e Amado (1987).
- Recolha de notas e títulos negociáveis nas Agências de um Banco Belga, Lambert et al (1993).

Para além dos exemplos de aplicação citados e em virtude da crescente importância dos aspectos económicos num mercado de livre concorrência, é previsível que a utilização de processos de optimização de rotas de veículos, como instrumento importante na redução de custos, venha a ser mais abrangente: quer por aplicação a um maior número de sectores de actividade, quer através da sua disseminação por empresas de média e pequena dimensão.

2.3 RESTRIÇÕES ADICIONAIS E EXTENSÕES

Como foi referido no ponto 2.1, no Problema de Optimização de Rotas de Veículos (PORV) considera-se um conjunto de N clientes servidos por uma frota de M viaturas que iniciam e finalizam as suas rotas num depósito central.

São conhecidas as localizações dos N clientes, do depósito, bem como as procuras de cada cliente e as capacidades de cada veículo.

A resolução do PORV tem como objectivo obter a configuração das rotas de cada veículo de modo a minimizar a distância total percorrida.

Este modelo básico não é, no entanto, de aplicação genérica aos problemas reais e concretos, havendo necessidade de o "adaptar" à especificidade de cada situação, através da introdução de restrições adicionais e/ou extensões ao modelo, das quais se apresentam, seguidamente, as mais frequentes, Schütz (1989).

2.3.1 RESTRIÇÕES

2.3.1.1 RESTRIÇÕES TEMPORAIS NOS VEÍCULOS

Devido ao limite máximo quanto ao número de horas diárias (horário de trabalho/legislação laboral em vigor) que os condutores das viaturas podem efectuar, as rotas a definir não poderão exceder essa duração pré-fixada, Christofides and Eilon (1969), Evans and Norback (1985).

Geralmente, inclui-se na duração da rota os tempos necessários à realização dos trajectos, às cargas e descargas quer no depósito central quer nos clientes, bem como os tempos de paragem para refeições e tempos de espera para efectuar as operações.

2.3.1.2 RESTRIÇÕES TEMPORAIS NOS CLIENTES

Num grande número de aplicações práticas existem condicionantes ao período de tempo³ em que cada cliente pode ser visitado, tanto por se situarem em locais (centros de cidades) de acesso condicionado em períodos de ponta pré-fixados, o

³ Time-windows

que obriga a que sejam servidos fora dessas "Janelas de Tempo", como devido à sua actividade exigir que as entregas/recolhas não se façam a certas horas do dia. Um exemplo desta ultima situação será o fornecimento de produtos a restaurantes, o qual não deverá ser efectuado durante o período das refeições (almoço e jantar).

As restrições de tempo nos clientes são um aspecto de extrema importância na aplicação prática realizada neste trabalho e apresentada no ponto 4, onde se descreve a necessidade de introdução dessas restrições nos algoritmos de resolução do PORV, por forma a garantir a qualidade de serviço exigida na distribuição postal da Região Sul dos Correios. As abordagens existentes e a bibliografia utilizada serão indicadas no ponto 3.3.

2.3.1.3 RESTRIÇÕES DE FROTA

O número de veículos é conhecido a priori, portanto não podem ser criadas mais rotas do que veículos disponíveis.

2.3.1.4 RESTRIÇÕES DE PRECEDÊNCIA

Nos problemas que envolvem distribuição e recolha de produtos surge, por vezes, a necessidade da recolha preceder a distribuição. Por exemplo, se alguns produtos do cliente A se destinam ao cliente B, então é necessário previamente visitar o cliente A antes de servir o cliente B. Em Dumas et al (1991) e Derigs and Metz (1992) são apresentados algoritmos que consideram esta situação.

Um exemplo deste tipo de problema será a troca de documentação e valores entre a Direcção Regional do Algarve do Banco X (DRB X) e as várias agências (AG) existentes na região através de uma transportadora externa, a qual inicia a sua rota efectuando a recolha na DRB X para posterior distribuição às AG, onde recolhe documentação com destino à DRB X, local onde finaliza a sua rota.

Noutros casos, ao contrário, a distribuição deve efectuar-se antes da recolha, Golden and Assad (1986). Esta é a situação típica dos transportadores de bens alimentares (frutas e hortícolas) do Algarve para os mercados abastecedores de Lisboa, onde descarregam toda a sua carga e, no retorno, recolhem outros tipos de

bens que se destinam ao Algarve, realizando o aproveitamento da sua capacidade disponível no regresso ao depósito⁴.

2.3.1.5 OUTRAS RESTRIÇÕES DE CAPACIDADE

Nalguns casos, existem também restrições de volume, por exemplo na distribuição de rolos de papel, de alimentos (peças de carne, etc.) (Evans and Norback (1985)), transporte de automóveis, entre outros.

2.3.2 EXTENSÕES

2.3.2.1 MÚLTIPLOS DEPÓSITOS

Face à existência de vários depósitos e considerando que cada veículo pode iniciar a sua rota num depósito e terminá-la noutra, então o problema deve afectar as partidas e chegadas de cada veículo aos depósitos e ter em conta as suas capacidades de estacionamento, Golden and Wasil (1987), Dell'Amico et al (1993).

Refira-se, por outro lado, que se cada viatura inicia e finaliza a sua rota no mesmo depósito, não interferindo com os outros depósitos, então é possível decompor o problema inicial de múltiplos depósitos em tantos problemas básicos de um único depósito quanto o número de depósitos existente no problema global.

2.3.2.2 MÚLTIPLOS PERÍODOS DE TEMPO

O planeamento das rotas é feito com o intuito de o repetir periodicamente ao longo de um determinado horizonte temporal, Golden e Wasil (1987).

⁴Aproveitamento do percurso de retorno normalmente designado por Backhauling.

2.3.2.3 DETERMINAÇÃO DA FROTA MÍNIMA

A função objectivo do problema inclui, neste caso, os custos de aquisição e/ou posse das viaturas. O número de veículos a utilizar não se encontra definido a priori, sendo o seu valor mínimo encontrado através da resolução do problema, Christofides and Eilon (1969), Gheysens et al (1986), Desrosiers et al (1988), Desrochers and Verhoog (1991).

2.3.2.4 PENALIDADES POR CLIENTE NÃO SERVIDO

Nalguns casos práticos, admite-se a possibilidade de um cliente não ser servido, ao qual se associa uma penalização incluída na Função Objectivo (F.O.).

É ainda possível, através da introdução de coeficientes ponderadores na F.O., diferenciar os clientes quanto à sua importância relativa, Balakrishnan (1993).

2.3.2.5 FROTA NÃO HOMOGÉNEA

Os veículos que compõem a frota disponível podem ter capacidades e/ou características específicas diferentes, sendo necessário afectar, por exemplo, os veículos de maior capacidade às rotas "mais pesadas" e vice-versa, ou seja, seleccionar as viaturas cujas especificações são adequadas às rotas geradas, Nag et al (1988).

Desrochers and Verhoog (1991) e Gheysens et al (1986) apresentam heurísticas que visam determinar a dimensão e tipologia óptimas da frota a utilizar e Ferland and Michelon (1988) mostram como os métodos exactos e heurísticos que consideram frotas homogéneas podem ser estendidos aos problemas de diferentes tipos de veículos.

Como foi referido, as restrições adicionais e extensões ao problema básico de optimização de rotas de veículos apresentadas não esgotam todas as possibilidades, sendo, no entanto, as mais frequentes.

A especificidade de alguns problemas práticos exigem a inclusão de eventuais restrições e/ou extensões específicas que não estão englobadas na exposição apresentada.

Devido à multiplicidade de problemas incluídos na designação de "Problemas de Optimização de Rotas de Veículos", surge a necessidade de efectuar a sua classificação em diferentes categorias de "problemas-tipo" que abarquem todos os aspectos envolvidos, o que se revela, no entanto, de difícil realização, face à diversidade dos problemas em causa. Ronen (1987) propõe um esquema classificativo que tem em consideração: as características da frota e dos depósitos, a natureza das procuras, o tipo de operações a efectuar, o tipo de rota e de ligações rodoviárias e os objectivos.

Essa classificação facilita quer a comunicação entre técnicos e investigadores, quer a modelização de problemas concretos e consequente selecção do método de resolução mais apropriado.

2.4 COMPLEXIDADE

A generalidade dos PORV não são resolúveis por algoritmos exactos de complexidade polinomial, pelo que são considerados como pertencendo à classe de problemas NP-completos, Lenstra and Rinnooy Kan (1981).

Esse facto está na origem do grande desenvolvimento e implementação de métodos aproximados ou heurísticos para a resolução do problema, em contraposição aos métodos exactos que exigem uma disponibilidade de tempo e suportes informáticos de dimensão incomportável.

A utilização de algoritmos heurísticos para a resolução do PORV, se bem que não conduzam garantidamente a soluções exactas, permitem a obtenção de soluções muito próximas do óptimo de forma rápida e com menor esforço computacional, o que se revela de especial importância para a resolução dos PORV nas situações reais de problemas de distribuição e/ou recolha de produtos que envolvem um elevado número de clientes a servir, através de uma frota de grande dimensão.

São referidos na literatura alguns exemplos sobre a dimensão máxima dos problemas para os quais se obtiveram resultados com a aplicação de algoritmos exactos, nomeadamente, Laporte and Norbert (1987) indicam que a dimensão máxima de problemas para os quais foi encontrada solução exacta é de 30 clientes e Christofides (1985) refere que o maior problema, de que tem conhecimento, para o qual foi encontrada solução óptima, envolve 53 clientes servidos por 8 veículos, considerando restrições de capacidade dos veículos, nos tempos de condução, frota

não homogénea e ainda tempos de descarga e "Janelas de Tempo" não muito "apertadas" nos clientes.

Em relação a problemas que envolvem restrições temporais "apertadas" nos clientes é indicado em Dumas et al (1991) e Desrochers et al (1992) que a dimensão máxima conhecida de problemas resolvidos optimamente é de 4 veículos servindo 14 clientes ou de 3 veículos servindo 15 clientes.

3. ABORDAGENS E METODOLOGIAS EXISTENTES PARA A RESOLUÇÃO DO PORV

Pretende-se, neste capítulo, descrever as abordagens e os métodos mais referidos na literatura para a resolução dos Problemas de Optimização de Rotas de Veículos (PORV) base e com Restrições Temporais nos Clientes (PORVJT).

A estratégia adoptada na apresentação subsequente foi a de referir os métodos mais relevantes dentro de cada tipo de abordagem, o que possibilita uma visão global da variedade de "propostas" desenvolvidas para a resolução daqueles problemas.

A enumeração e exposição das várias metodologias (seguidamente realizada) foi subdividida em quatro grupos:

- Algoritmos Exactos
- Algoritmos Heurísticos
- Algoritmos para resolução do PORV com Restrições Temporais nos Clientes
- Processamento Paralelo

referindo-se, no decurso dessa apresentação, os métodos que posteriormente foram utilizados na aplicação prática descrita no capítulo 4.

No texto seguinte considera-se, salvo indicação expressa em contrário, que:

N - Número de clientes a servir (incluindo o depósito, designado por cliente 1)

M - Número de veículos da frota existente

Q_k - Capacidade de carga do veículo k , $k=1,\dots,M$

q_i - Procura do cliente i , $i=2,\dots,N$ (a procura no depósito é zero)

c_{ij} - Distância entre i e j , $i, j=1,\dots,N$

3.1 ALGORITMOS EXACTOS

Os algoritmos exactos, que conduzem à obtenção de soluções óptimas para o problema, são adequados unicamente à resolução do PORV de pequena dimensão, tendo por isso uma aplicabilidade bastante limitada.

A grande dimensão e complexidade da generalidade dos actuais problemas a tratar inviabiliza a sua adopção, pois os tempos de execução e os suportes informáticos necessários seriam inoportáveis.

Contudo, a apresentação e análise dessas metodologias reveste-se de particular interesse, pois permite:

- i) Uma visão histórica do percurso da investigação realizada nesta área.
- ii) Conhecer as distintas abordagens para a resolução do problema, propostas por cada algoritmo.
- iii) Fundamentar alguns métodos heurísticos, que foram desenvolvidos a partir de métodos exactos, aos quais introduzem alterações mantendo a sua estrutura inicial.

Face ao exposto apresentam-se, de seguida, os algoritmos exactos mais referidos na literatura, indicando-se para cada um a formalização que lhe serve de base.

3.1.1 UM ALGORITMO BASEADO NA DECOMPOSIÇÃO DE BENDERS

Este algoritmo baseia-se na seguinte formalização (referida em Christofides (1985)):

Seja $x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } k \text{ visita o cliente } j \text{ imediatamente depois do cliente } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{se o cliente } i \text{ é visitado pelo veículo } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

O problema de otimização de rotas de veículos vem:

$$\text{Min } \sum_{i,j} c_{ij} \sum_k x_{ijk} \quad (3.1)$$

$$\text{s. a } \sum_k y_{ik} = \begin{cases} 1, & i = 2, \dots, N \\ M, & i = 1 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\sum_i q_i y_{ik} \leq Q_k, \quad k = 1, \dots, M \quad (3.3)$$

$$\sum_j x_{ijk} = \sum_j x_{jik} = y_{ik}, \quad i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, M \quad (3.4)$$

$$\sum_{i,j \in S \& S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subseteq \{2, \dots, N\}, 2 \leq |S| \leq N - 1, \quad (3.5)$$

$$k = 1, \dots, M$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, M \quad (3.6a)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, M \quad (3.6b)$$

A Função Objectivo (3.1) representa a minimização do percurso total.

As restrições (3.2) asseguram que qualquer cliente é afecto a algum veículo (excepto o depósito, $i=1$, que é visitado por todos os veículos), as restrições (3.3) garantem que a capacidade dos veículos não é excedida, as restrições (3.4) asseguram que um veículo que visita um cliente, volta a sair desse cliente, as restrições (3.5) evitam a formação de subcircuitos para o Problema do Caixeiro Viajante (PCV)⁵ e as restrições (3.6a) e (3.6b) definem as variáveis como binárias.

Esta formalização encerra na sua estrutura dois subproblemas interligados, geralmente designados por Problema de Afectação Generalizada (PAG)⁶ (que determina a afectação dos clientes às rotas) definido pelas restrições (3.2), (3.3) e (3.6a) e Problema do Caixeiro Viajante (PCV) (que determina a configuração óptima da rota) definido pelas restrições (3.4), (3.5) e (3.6b), podendo ser reescrita de modo a evidenciar a estrutura dos dois subproblemas, resultando na seguinte apresentação:

⁵ Traveling Salesman Problem (TSP)

⁶ Generalized Assignment Problem (GAP)

$$\begin{aligned} \text{Min } \sum_k f(y_k) & \quad (3.7) \\ \text{s. a (3.2), (3.3) e (3.6a)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{com } f(y_k) = \text{Min } \sum_{i,j} c_{ij} x_{ijk} & \quad (3.8) \\ \text{s. a (3.4), (3.5) e (3.6b)} \end{aligned}$$

A função $f(y_k)$ é bastante complexa e não pode ser explicitada. Christofides (1985) apresenta uma abordagem possível para ultrapassar esta dificuldade que consiste em efectuar iterativamente a construção de uma aproximação linear de $f(y_k)$ por aplicação da decomposição de Benders, possibilitando a resolução iterativa do problema principal definido por (3.7), (3.2), (3.3) e (3.6a) que corresponde a um PAG e dos M PCV definidos por (3.8), (3.4), (3.5) e (3.6b).

Em cada iteração são obtidas soluções admissíveis e minorantes do óptimo para o PORV. Deste modo, este algoritmo pode ser utilizado como um algoritmo exacto, ou terminar antes de se obter garantidamente a solução óptima, tornando-se num método heurístico.

3.1.2 UM ALGORITMO BASEADO NUM PROBLEMA DE PARTIÇÃO DE UM CONJUNTO

Considere-se $R = \{1, \dots, \hat{r}\}$ o conjunto de todas as rotas admissíveis (que cumprem as restrições de capacidade dos veículos) para o Problema.

Seja:

$N_i \subseteq R$ o conjunto das rotas que incluem o cliente i
 d_r o comprimento (ou custo) total da rota $r \in R$

$$y_r = \begin{cases} 1, & \text{se a rota } r \text{ pertence à solução óptima do PORV} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

O problema vem então (Almeida (1988), Schütz (1989)):

$$\text{Min } \sum_{r=1}^{\hat{r}} d_r y_r \quad (3.9)$$

$$\text{s. a } \sum_{r \in N_i} y_r = 1, \quad i = 1, \dots, N \quad (3.10)$$

$$y_r \in \{0, 1\}, \quad \forall r \in R \quad (3.11)$$

A função objectivo (3.9) traduz a minimização da distancia total.

As restrições (3.10) garantem que todos os clientes são visitados e as restrições (3.11) definem as variáveis como binárias.

O problema definido por (3.9), (3.10) e (3.11) é o Problema de Partição de um Conjunto (PPC).

Qualquer dos algoritmos desenvolvidos para a resolução de Problemas de Partição de Conjuntos pode ser facilmente adaptado para resolver o Problema referido.

Esta metodologia de resolução do PORV apresenta limitações quanto à sua utilização em virtude da necessidade de enumerar todas as rotas r pertencentes ao $\{1, \dots, \hat{r}\}$, pelo que mesmo em problemas de dimensão moderada (com poucos clientes por cada rota), a geração de todas as rotas possíveis não é tarefa fácil. Por outro lado, quanto mais restrições existirem no PORV, menor será o número de rotas admissíveis a considerar, tornando-se vantajosa a aplicação desta abordagem para a resolução do problema.

3.1.3 UM ALGORITMO BASEADO NA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

Seja $f(k, S)$ o mínimo custo para servir um subconjunto S de clientes usando os primeiros k veículos $(1, \dots, k)$ e $v(L)$ o custo mínimo da solução do Problema do Caixeiro Viajante (PCV) definido pelo depósito e pelo conjunto L de clientes.

O processo recursivo da programação dinâmica vem (Christofides (1985)):

$$f(k, S) = \underset{L \subset S}{\text{Min}} [f(k-1, S-L) + v(L)] \quad (3.12)$$

$$\text{s. a } \sum_{i \in S} q_i - \sum_{\alpha=1}^{k-1} Q_\alpha \leq \sum_{i \in L} q_i \leq Q_k \quad (3.13)$$

$$\frac{1}{M-k} \left\{ \sum_{i \in N} q_i - \sum_{i \in S} q_i \right\} \leq \sum_{i \in L} q_i \leq \frac{1}{k} \sum_{i \in S} q_i \quad (3.14)$$

com $k = 2, \dots, M$, excepto para o lado esquerdo da expressão (3.14) para o qual $k = 2, \dots, M-1$.

Os subconjuntos S devem satisfazer:

$$\sum_{i \in N} q_i - \sum_{\alpha=k+1}^M Q_\alpha \leq \sum_{i \in S} q_i \leq \sum_{\alpha=1}^M Q_\alpha \quad (3.15)$$

As restrições impostas sobre os conjuntos L e S permitem evitar a computação de $f(\cdot)$ e $v(\cdot)$ para conjuntos que iriam conduzir à violação das restrições de capacidade. O processo recursivo é inicializado com o estabelecimento da igualdade $f(1, S) = v(S)$. O lado direito da expressão (3.13) é a restrição de capacidade do veículo k , enquanto que o lado esquerdo da mesma expressão é a restrição de capacidade dos primeiros $k-1$ veículos.

Foi imposta uma ordem nas rotas de modo a que uma rota de maior peso seja efectuada por um veículo de maior capacidade e vice-versa. A cada rota é afectado o veículo específico que a executa. As restrições (3.14) impõem parcialmente a ordem referida, definindo que o peso da rota k é maior que o peso médio das restantes $M-k$ rotas, e menor do que a média dos pesos das primeiras $k-1$ rotas.

Christofides et al (1981b) e Christofides (1985) propõem a relaxação do espaço dos estados na qual o estado original (k, S) inserido na expressão (3.12) é substituído por outro, de inferior dimensão, definido por $(k, g(S))$ onde $g(S) = \sum_{i \in S} q_i = q$. Através da resolução do problema relaxado obtêm-se os minorantes a utilizar posteriormente num processo de Pesquisa em Árvore (PA).

A eficácia do algoritmo depende inteiramente da qualidade dos minorantes obtidos e utilizados para limitar a pesquisa em árvore, referindo os autores que os minorantes obtidos pelo processo indicado são, em geral, de excelente qualidade.

Kolen et al (1987) apresentam um método de optimização de pesquisa em árvore inspirado no algoritmo anterior, implementando uma diferente relaxação do espaço de estados.

3.1.4 UM ALGORITMO BASEADO NO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE

Seja:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } k \text{ vai de } i \text{ para } j \text{ directamente} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

O problema pode formular-se como (Golden et al (1977) e Almeida (1988)):

$$\text{Min } \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} x_{ijk} \quad (3.16)$$

$$\text{s. a } \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M x_{ijk} = 1, \quad j = 2, \dots, N \quad (3.17)$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M x_{ijk} = 1, \quad i = 2, \dots, N \quad (3.18)$$

$$\sum_{i=1}^N (x_{ijk} - x_{jik}) = 0, \quad k = 1, \dots, M; j = 1, \dots, N \quad (3.19)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{1jk} \leq 1, \quad k = 1, \dots, M \quad (3.20)$$

$$\sum_{i=2}^N q_i \left(\sum_{j=1}^N x_{ijk} \right) \leq Q_k, \quad k = 1, \dots, M \quad (3.21)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, M \quad (3.22)$$

$$X \in S \quad (3.23)$$

A função objectivo (3.16) traduz a minimização do comprimento total do trajecto a efectuar pela frota. As restrições (3.17), (3.18) e (3.19) garantem que cada cliente é visitado exactamente uma vez e que o veículo que entra numa localização volta a sair dela. As restrições (3.20) asseguram que cada veículo não efectua mais do que uma rota. As restrições (3.21) referem-se às capacidades dos veículos. As restrições (3.22) definem as variáveis como binárias e as restrições (3.23) evitam a formação

de subcircuitos que não passam pelo depósito central e podem ser expressas de diversas formas, Christofides (1979), Schütz (1989).

Esta formalização apresentada por Golden et al (1977), baseia-se na interpretação do PORV como uma extensão do Problema do Caixeiro Viajante (PCV), pois este pode ser encarado como um PORV com um depósito e um único veículo de capacidade superior à procura total dos clientes.

Através da exclusão das restrições (3.17) (redundantes em presença das restantes) e de relaxação lagrangeana das restrições (3.18), obtém-se o problema relaxado que se pode decompor em M Problemas, um para cada veículo.

A utilização desta abordagem apresenta como inconveniente a dificuldade de resolução dos problemas relaxados e a possibilidade de, na sua resolução, ser feita a afectação de um mesmo cliente a vários veículos, o que conduz a uma inferior qualidade do minorante obtido.

3.1.5 UM ALGORITMO BASEADO NO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE MÚLTIPLO

O PORV pode ser entendido como uma generalização do Problema do Caixeiro Viajante Múltiplo (PCVM) (que é por sua vez uma generalização do PCV em que são permitidas várias passagens pelo depósito central) com restrições na carga total a transportar por cada caixeiro.

Esta ideia foi explorada por Christofides (1985) e Christofides et al (1981a) que, com base na formalização seguinte, desenvolveram métodos de pesquisa em árvore, em que os minorantes são determinados através da resolução de problemas de determinação de uma árvore geradora com grau k no centro.

Se numa qualquer solução admissível do PCVM for eliminado um conjunto S_0 de $y \leq M$ arcos adjacentes ao depósito e um conjunto S_1 de $M - y$ arcos (com M igual ao número de caixeiros) o grafo resultante, se for conexo, é uma árvore geradora cujo centro tem grau $k = 2M - y$.

Sejam as variáveis:

$$x_l = \begin{cases} 1, & \text{se o arco } l \text{ pertence à árvore com grau } k \text{ no centro} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$x_l^0 = \begin{cases} 1, & \text{se o arco } l \text{ pertence ao conjunto } S_0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$x_l^1 = \begin{cases} 1, & \text{se o arco } l \text{ pertence ao conjunto } S_1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A formalização vem:

$$\text{Min } \sum_l c_l (x_l + x_l^0 + x_l^1) \quad (3.24)$$

$$\text{s. a } \sum_{l \in (V_i, \bar{V}_i)} x_l \geq 1, \quad \forall V_i \subseteq V, V_i \neq \emptyset \quad (3.25)$$

$$\sum_{l \in A_i} x_l = 2M - y \quad (3.26)$$

$$\sum_l x_l = N \quad (3.27)$$

$$\sum_{l \in A_i} x_l^0 = y, \quad y \leq M \quad (3.28)$$

$$\sum_{l \in A_i} (x_l + x_l^0 + x_l^1) = 2, \quad \forall i \neq 1 \quad (3.29)$$

$$x_l \in \{0, 1\}, \quad \forall l \quad (3.30a)$$

$$x_l^0 \in \{0, 1\}, \quad \forall l \quad (3.30b)$$

$$x_l^1 \in \{0, 1\}, \quad \forall l \quad (3.30c)$$

onde c_l é o custo do arco l , A_i é o conjunto dos arcos incidentes em i e (V_i, \bar{V}_i) é o conjunto de todos os arcos com um vértice extremo pertencente ao conjunto de vértices V_i e com o outro vértice pertencendo ao conjunto complementar \bar{V}_i .

A função objectivo (3.24) representa a minimização da distancia total. As restrições (3.25) garantem que a solução é conexa. As restrições (3.26), (3.27) e (3.28) impõem o número correcto de arcos na solução. As restrições (3.29) impõem que cada cliente seja visitado exactamente uma vez e as restrições (3.30) definem as variáveis como binárias.

O minorante para o valor da solução óptima do PCVM (e consequentemente para o valor da solução óptima do PORV) é obtido por relaxação lagrangeana das restrições (3.29), sendo posteriormente utilizado para limitar a Pesquisa em Árvore (PA).

3.2 ALGORITMOS HEURÍSTICOS

Dada a complexidade computacional dos Problemas de Optimização de Rotas de Veículos, muito trabalho tem sido dedicado ao desenvolvimento de algoritmos que permitam obter soluções aproximadamente óptimas, com um esforço computacional mais reduzido, quando comparado com os métodos exactos.

Face à diversidade de métodos heurísticos existentes, é conveniente e usual diferenciá-los quanto ao tipo, estratégia e nº de etapas utilizadas no processo, podendo ser classificados como *construtivos*, se se destinam à construção duma solução admissível ou, de tipo *melhorativo*, se se destinam a melhorar uma solução admissível já conhecida. De acordo com a estratégia de construção utilizada, os métodos construtivos podem ainda classificar-se em *sequenciais*, quando cada rota é construída em separado e só é iniciada a construção de uma nova rota depois de terminada a construção da anterior ou, *em paralelo*, quando diversas rotas vão sendo construídas em simultâneo.

A construção das rotas pode ser feita apenas *numa etapa ou em duas*. Neste último caso, a primeira fase destina-se a agrupar os clientes a incluir em cada rota (afecção dos clientes aos veículos) e, a segunda fase a determinar a sequência pela qual devem ser visitados os clientes incluídos numa mesma rota.

Apresentam-se, em seguida, os principais métodos referenciados na literatura para a resolução aproximada do PORV.

3.2.1 O ALGORITMO DE CLARKE E WRIGHT (Clarke and Wright (1964))

Esta heurística construtiva de rota foi uma das primeiras a ser desenvolvida para o PORV e é sem dúvida a mais conhecida e citada na literatura.

O algoritmo começa com uma solução em que cada cliente é servido separadamente por um veículo que parte do depósito central. Esta solução inicial é, em geral, não admissível (pois obrigaria a que existissem pelo menos tantos veículos quanto o número de clientes).

Considere-se o depósito central como o cliente zero e c_{ij} a distância do cliente i ao cliente j ($i, j = 0, \dots, N$). O custo de servir os clientes i e j em separado, considerando que as distâncias são simétricas, ou seja, $c_{kl} = c_{lk}$, $\forall k, l$ é :

$$2(c_{0i} + c_{0j})$$

Agrupando os clientes i e j na mesma rota, obtém-se um custo de :

$$c_{0i} + c_{ij} + c_{0j}$$

A diferença entre os dois custos resulta numa poupança⁷ S_{ij} definida por:

$$S_{ij} = 2(c_{0i} + c_{0j}) - (c_{0i} + c_{ij} + c_{0j}) \text{ ou seja,}$$

$$S_{ij} = c_{0i} + c_{0j} - c_{ij}$$

em que:

$$S_{ij} \begin{cases} > 0, & \text{se o custo de servir os clientes } i \text{ e } j \text{ em separado é maior do que} \\ & \text{o custo de os servir em conjunto, na mesma rota.} \\ < 0, & \text{situação inversa} \end{cases}$$

Seguidamente ordenam-se as poupanças calculadas por ordem decrescente e faz-se a junção dos clientes com maior S_{ij} positivo, desde que não sejam violadas as restrições de capacidade dos veículos.

Esta operação é repetida até terminar a lista das S_{ij} tendo em conta que dois clientes só podem ser ligados se não fizerem parte da mesma rota e se nenhum deles for

⁷ Savings



interior a uma rota já existente (exceptuando-se a rota depósito - cliente - depósito da solução inicial).

Neste algoritmo, as rotas podem ser construídas parcialmente e em simultâneo para todos os veículos (*versão paralelo*) ou juntar os clientes numa rota até o veículo atingir a sua capacidade máxima e só depois iniciar a construção da rota seguinte (*versão sequencial*).

De referir que este método simples e eficiente pode, no entanto, conduzir a uma solução não admissível por ficarem clientes por servir ou existirem mais rotas do que veículos disponíveis.

3.2.2 MÉTODOS DE DUAS FASES

São referidos, neste ponto, três métodos distintos de duas fases, nomeadamente, o de Gillet e Miller, o de Christofides, Mingozzi e Toth e o de Fisher e Jaikumar. A apresentação desses algoritmos deve-se ao facto de, por um lado, serem os mais referidos na literatura e, por outro, de os dois últimos serem utilizados na aplicação prática descrita no ponto 4.

3.2.2.1 O ALGORITMO DE GILLET E MILLER⁸ (Gillet and Miller (1974))

Este é um método sequencial de duas fases em que se agrupam, numa primeira fase, os clientes aos veículos em função das suas localizações espaciais e, numa segunda fase, se determina a sequência pela qual são servidos os clientes incluídos na mesma rota, através do algoritmo de Lin and Kernighan (1973) para o PCV.

Considerem-se as coordenadas polares (r, θ) de cada cliente referidas a um sistema de eixos cuja origem é o depósito central ($r = 0$) e listem-se os clientes por ordem crescente dos seus valores de θ ($\theta(i) < \theta(i+1)$).

⁸ Sweep Algorithm

Os procedimentos do algoritmo são os seguintes:

Fase I - Afecção dos clientes a cada veículo

1) Escolhe-se um veículo disponível V

2) Começando com o cliente de menor θ , ainda não incluído numa rota anterior, seja k , incluem-se os clientes $k, k+1, \dots, L$ na lista dos clientes a serem servidos por V , enquanto a sua capacidade o permitir. O comprimento da rota assim obtida é igual à soma das distâncias euclidianas entre os clientes, mais as distâncias euclidianas do Depósito Central aos clientes k e L .

3) Repete-se 1) e 2) até todos os veículos terem sido utilizados ou todos os clientes terem sido considerados.

4) Fazem-se trocas de clientes entre as listas formadas, até não haver melhoramento, obtendo-se um valor para a distância total que é igual à soma das distâncias de cada rota.

5) Faz-se uma rotação dos eixos de modo que o primeiro cliente passe a ser o último, o segundo passe a ser o primeiro e assim sucessivamente. Repete-se 1) a 4) obtendo-se outro valor para a distância total e vai-se repetindo 5) até terem sido examinadas todas as possibilidades.

6) As rotas correspondentes ao menor valor entre os valores obtidos para a distância total, formam a solução da 1ª fase e passa-se à 2ª fase.

Nota: A Fase I acima descrita considera o "varrimento" do espaço no sentido anti-horário⁹. É, no entanto, possível efectuá-lo em sentido contrário, ou seja, no sentido horário¹⁰, procedendo-se à inclusão dos clientes por ordem decrescente dos seus valores de θ , o que conduz a uma solução diferente.

Fase II - Determina-se a configuração das rotas dos veículos, resolvendo os PCV obtidos (um por cada rota formada) usando a heurística de Lin-Kernighan para o PCV (ou qualquer outra heurística), partindo da solução em 6).

⁹ Forward Sweep

¹⁰ Backward Sweep

A aplicação deste método pode conduzir a uma solução final não admissível por ficarem clientes por servir ou ser necessário um maior número de veículos do que os disponíveis, como acontece para o método de Clarke e Wright exposto no ponto 3.2.1.

3.2.2.2 O MÉTODO DE CHRISTOFIDES, MINGOZZI E TOTH (Christofides et al (1979))

A primeira fase desta heurística consiste na realização da afectação dos clientes aos veículos usando um critério de inserção de menor custo, de modo sequencial (passos 1 e 2) e em paralelo (passos 3 a 6), e a segunda fase na resolução do PCV para cada veículo.

A metodologia é a seguinte:

Fase I

1) Selecção de um cliente para "semente"¹¹, de entre os que não estão afectos a algum veículo. Escolha do veículo k para realizar a rota a definir, que inclui o cliente "semente".

2) Introduzir os clientes "livres" (que não estão afectos a algum veículo) na rota afecta ao cliente "semente" por ordem crescente dos "custos de inserção" definidos por:

$$d_{ik} = c_{0i} + c_{ii_k} - c_{0i_k}$$

onde:

d_{ik} é o "custo de inserção" do cliente i em relação à "semente" k

$i_k \in \{\text{"sementes"}\}$

c_{ij} é a distância euclidiana entre i e j .

até se atingir o limite de capacidade do veículo k .

¹¹ Seed

Se todos os clientes se encontram afectos a algum veículo ou se foram utilizados todos os veículos disponíveis, memorizar a solução encontrada e seguir para passo 3). Caso contrário, repete passos 1) e 2).

3) Utilizando as "sementes" escolhidas em 1), libertam-se todos os clientes das afectações estabelecidas.

4) Para cada cliente "livre", calculam-se os "custos de inserção" (atrás definidos) relativamente à "semente" de cada rota em que é admissível a sua introdução. Considerando todas as rotas ("sementes"), guarda-se o melhor valor do "custo de inserção" desse cliente.

5) De todos os clientes "livres", introduz-se na rota respectiva o que possuir o menor "custo de inserção".

6) Repete-se o passo 4) para cada cliente "livre" cuja anterior melhor inserção deixou de ser admissível e continua-se com o passo 5) até que nenhuma inserção admissível seja possível.

Fase II

7) Para ambas as afectações dos clientes aos veículos formadas (passos 2) e 5)), resolve-se o PCV para cada rota, sendo a solução do PORV a melhor das duas obtidas.

Os autores referem ainda a possibilidade de introduzir um parâmetro extra na medição dos "custos de inserção", que permite a obtenção de afectações diferentes dos clientes aos veículos (Fase I), consoante o valor adoptado para o mesmo.

Esta heurística foi utilizada para a resolução do caso real apresentado no ponto 4, onde se efectuará a sua descrição com maior detalhe.

3.2.2.3 O MÉTODO DE FISHER E JAIKUMAR (Fisher and Jaikumar (1981))

A heurística de duas fases de Fisher e Jaikumar apresenta diferenças relativamente a outros métodos de duas fases (por exemplo, em relação ao método referido no ponto

anterior) quanto à forma de resolução da 1ª fase, na qual a afectação dos clientes aos veículos é feita resolvendo um Problema de Afectação Generalizada (PAG)¹², obtendo-se portanto, se existir, uma afectação admissível, ou seja, todos os clientes ficam afectos a algum veículo, são formados tantos conjuntos de clientes quanto o número de veículos disponíveis e não são excedidas as capacidades dos veículos. Para definir as configurações das rotas (2ª fase) utiliza-se qualquer método de resolução do Problema do Caixeiro Viajante (PCV).

Considere-se a formalização seguinte (idêntica à apresentada no ponto 3.1.1):

$$\text{Seja } x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } k \text{ visita o cliente } j \text{ imediatamente depois do cliente } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{se o cliente } i \text{ é visitado pelo veículo } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

O problema de optimização de rotas de veículos vem:

$$\text{Min } \sum_{i,j} c_{ij} \sum_k x_{ijk} \quad (3.1)$$

$$\text{s. a } \sum_k y_{ik} = \begin{cases} 1, & i = 2, \dots, N \\ M, & i = 1 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\sum_i q_i y_{ik} \leq Q_k, \quad k = 1, \dots, M \quad (3.3)$$

$$\sum_j x_{ijk} = \sum_j x_{jik} = y_{ik}, \quad i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, M \quad (3.4)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subseteq \{2, \dots, N\}, 2 \leq |S| \leq N - 1, \quad (3.5)$$

$$k = 1, \dots, M$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, M \quad (3.6a)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, M \quad (3.6b)$$

¹² Generalized Assignment Problem (GAP)

A Função Objectivo (3.1) representa a minimização do percurso total.

As restrições (3.2) asseguram que qualquer cliente é afecto a algum veículo (excepto o depósito, $i=1$, que é visitado por todos os veículos), as restrições (3.3) garantem que a capacidade dos veículos não é excedida, as restrições (3.4) asseguram que um veículo que visita um cliente, volta a sair desse cliente, as restrições (3.5) evitam a formação de subcircuitos para o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e as restrições (3.6a) e (3.6b) definem as variáveis como binárias.

A metodologia de resolução adoptada é:

Fase I

1) Escolha dos clientes para serem "sementes" das M rotas a estabelecer. Afectar um veículo a cada "semente".

2) Para cada cliente, calcular os "custos de inserção", d_{ik} , relativos a cada "semente"/rota.

3) Resolver o Problema de Afectação Generalizada (PAG) definido por:

$$\text{Min } \sum_{i,k} d_{ik} y_{ik} \quad (3.31)$$

s. a (2), (3) e (6a)

Fase II

4) Resolver o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) para cada um dos conjuntos de clientes afectos a cada "semente".

No ponto 4 realizar-se-á uma descrição mais aprofundada deste método, em virtude da sua utilização na resolução do problema prático proposto.

3.2.3 SIMULAÇÃO DE TEMPERA¹³

Este tipo de heurística, inicialmente desenvolvida por Kirkpatrick, Gelatt and Vecchi em 1983, baseia-se na analogia que pode ser estabelecida entre a pesquisa de uma solução óptima local para um problema de otimização combinatória e o comportamento de um sistema físico quando a sua temperatura é elevada a um nível bastante alto e depois sucessivamente arrefecido até o sistema atingir a temperatura ambiente (Osman and Christofides (1994)).

O método pode também ser interpretado como uma versão modificada dos procedimentos tradicionais de pesquisa local em que o objectivo é evitar os óptimos locais de má qualidade em que esses métodos estacionariam.

Por forma a possibilitar uma melhor apresentação e entendimento do método, considere-se a ideia de estabelecer a analogia entre duas actividades que aparentemente nada têm em comum: O crescimento de um cristal e a pesquisa de uma solução óptima (Alves e Almeida (1992)).

Para efectuar o crescimento de um cristal eleva-se inicialmente a sua temperatura a um nível bastante elevado (ponto de fusão) e posteriormente produz-se o arrefecimento até à temperatura ambiente. Se o arrefecimento for efectuado de uma forma muito rápida, a estrutura resultante tende a ser muito frágil e o seu nível de energia muito elevado. Esta é, por exemplo, a situação de tratamento térmico de têmpera aos aços, amplamente utilizado na modificação das características mecânicas dos materiais, na área da Engenharia Mecânica.

Por outro lado, se o arrefecimento for executado de forma gradual e lenta, i.é., se se baixar a temperatura passo a passo, permitindo que em cada nível de temperatura seja atingido o equilíbrio (permanecendo em cada nível o tempo suficiente), então a estrutura do cristal obtido será melhor e conseqüentemente o seu nível de energia mais baixo.

No primeiro caso, o sistema é "empurrado" rapidamente para um estado do qual não tem saída possível, mesmo encontrando-se muito afastado do valor global de energia mínimo; enquanto no segundo, é dada oportunidade ao sistema de tentar encontrar o

¹³ Simulated Annealing

caminho em direção ao estado de energia mínimo, ou seja, permite-se que o crescimento da rede cristalina se faça através das ligações químicas que conduzem ao menor nível final de energia.

Conforme referem Alves e Almeida (1992), os procedimentos tradicionais de pesquisa local podem, nesta óptica, ser interpretados como equivalentes ao arrefecimento rápido do sistema e a estratégia de pesquisa da meta heurística "Simulated Annealing" é equivalente ao procedimento de arrefecimento gradual e lento, técnica esta que se julga mais sensata e eficaz na procura de boas soluções.

Na resolução de um problema de otimização combinatória representa-se a temperatura real, o mecanismo físico de arrefecimento e o tempo gasto em cada patamar térmico por parâmetros (pré-definidos no início do processo), os quais mantêm os seus nomes originais para enfatizar a analogia com o sistema físico (Alves e Almeida (1992)). Considera-se que a possibilidade de alteração da solução corrente é muito pequena quando é atingida a temperatura (T) "ambiente" ($T_{\text{ambiente}} = 0$ na implementação referida em Osman (1993)), ou seja, o fim do processo de arrefecimento.

A grande flexibilidade desta técnica de pesquisa advém da aleatoriedade do critério de aceitação de soluções.

Uma nova solução é aceite se os seus custos são melhores do que os da solução corrente, mas também pode ser aceite se os custos forem maiores. Movimentações de maiores custos são admitidas com uma probabilidade decrescente à medida que a temperatura vai baixando, Osman (1993).

Alves e Almeida (1992) e Osman (1993) indicam que a aplicação deste tipo de algoritmos para a resolução de problemas de otimização combinatória exige a definição de quais os tipos de solução e custos a considerar, bem como o estabelecimento das fronteiras da vizinhança onde se realizará a pesquisa. É ainda necessário definir os valores dos parâmetros e adoptar um critério de paragem.

Uma implementação desta técnica para a resolução de Problemas de Otimização de Rotas de Veículos (PORV) é apresentada em Osman (1993) e em Osman and Christofides (1994) é descrito um algoritmo híbrido de "Simulated Annealing" e "Tabu Search" que, segundo referem os autores, tem sido usado com sucesso na resolução do PORV.

3.2.4 PESQUISA TABU¹⁴

Este tipo de método é normalmente classificado como meta-heurística de pesquisa, conforme referem Lokketangen et al (1994) e Fiechter et al (1992), face à sua necessária utilização em conjunto com outras heurísticas tradicionais de pesquisa local, analogamente ao que sucede com a heurística "Simulated Annealing" atrás descrita.

O objectivo da utilização da pesquisa Tabu é o de, no curto prazo, conduzir as outras heurísticas para fora de óptimos locais e, no médio e longo prazo, diversificar e intensificar a pesquisa.

Este método assenta no uso de sistemas flexíveis de memória que permitem tirar partido da história do processo de resolução e foi inicialmente proposto por Fred Glover em 1986.

Rego (1994) refere que uma das características principais do método reside no facto de que os movimentos elementares efectuados para passar de uma solução (obtida por um processo de pesquisa local) à seguinte são autorizados a deteriorar o valor corrente da função custo. O procedimento não pára logo que é atingido um óptimo local, mas pode sair dele efectuando o movimento menos mau, i.é., o menos degradante.

A segunda característica do método consiste na introdução de restrições Tabu que proíbem movimentos precedentes durante um certo número de iterações. Estes movimentos são introduzidos numa lista circular constantemente actualizada: a lista Tabu (função de memória de curto prazo).

O principal objectivo das restrições Tabu é o de permitir ao método sair de soluções à volta do óptimo local, conduzindo o processo noutras direcções.

Um aspecto crítico do processo, referido por Lokketangen et al (1994) e Rego (1994), é a dimensão da lista Tabu: se for muito pequena, a pesquisa fixa-se em torno do óptimo local; se for muito grande, muitos movimentos que podem conduzir à obtenção do óptimo são proibidos, por constarem na lista Tabu.

Assim, a restrição de movimentos induzida pela lista Tabu pode tornar-se muito rígida. Um modo de obviar esta situação é usar o denominado *critério de aspiração*

¹⁴ Tabu Search

(Ver Fiechter et al (1992), Lokketangen et al (1994) e Rego (1994)) que autoriza a retirada do estatuto Tabu ao movimento correspondente.

Um *critério de aspiração simples*, indicado em Lokketangen et al (1994), é o de permitir um movimento se ele gerar uma solução melhor do que a melhor solução corrente.

Este método utiliza também funções de memória de médio e longo termo que possibilitam a condução do processo de pesquisa para novas áreas (*diversificação da pesquisa*) ou visitar áreas que historicamente se revelaram boas (*intensificação da pesquisa*) (Lokketangen et al (1994)).

Em Osman (1993) e Rego (1994) são apresentadas heurísticas Tabu para a resolução do problema clássico de determinação de rotas de veículos e em Semet and Taillard (1993) é descrita uma aplicação desta metodologia na definição das rotas para servir uma cadeia de distribuição Suíça de 45 lojas, que considera restrições de capacidade, "Janelas de Tempo" nas lojas e frota heterogénea.

3.2.5 ALGORITMOS GENÉTICOS

Como é evidenciado na anterior apresentação (ponto 3.2.2) das heurísticas de duas fases para a resolução do PORV, executa-se numa primeira fase a afectação dos clientes aos veículos e numa segunda a configuração das rotas através da resolução de M Problemas do Caixeiro Viajante (PCV).

Facilmente se compreenderá que qualquer melhoramento nos métodos de resolução tanto da 1ª como da 2ª fase conduzem a uma melhor solução para o problema global (PORV).

Vários são os métodos referidos na literatura para a resolução do PCV, os quais não se apresentam por não ser esse o objectivo deste trabalho. No entanto, uma abordagem menos "tradicional" a esse problema é a utilização de *algoritmos genéticos* na sua resolução, pelo que se entendeu interessante efectuar aqui, a título de exemplo, a sua descrição, face às suas características específicas e bom desempenho (conforme indicam os autores seguidamente referenciados).

Esse tipo de algoritmos, inicialmente proposto por Holland em 1975, surge como desenvolvimento da ideia sobre a existência de analogias entre a evolução das espécies biológicas na sua adaptação ao meio físico (Teoria de Darwin) e a estratégia

geral a adoptar na pesquisa de soluções para problemas de optimização combinatória, donde resulta uma terminologia marcadamente "biológica" na definição e apresentação do método.

Os algoritmos genéticos baseiam-se na representação das possíveis soluções para um dado problema através de cadeias de códigos binários (que em conjunto formam uma população), sobre as quais se efectuam transformações análogas à reprodução e evolução biológicas que permitem variar e melhorar as soluções codificadas.

O mecanismo de transformação genética da população no processo de adaptação e evolução artificial assenta em três componentes principais, Goldberg (1989) e Lin and Hajela (1992):

- Reprodução
- Cruzamento
- Mutação

O processo de *reprodução* consiste na selecção dos elementos da população que melhor se adequam ao meio (biologia) ou que melhores valores produzem na função objectivo (processo de optimização).

Uma abordagem possível para seleccionar esses elementos, a partir da população inicial, é atribuir a cada membro a probabilidade de selecção $\frac{f_i}{\sum_m f_i}$, onde f_i é o

valor da função de "ajustamento" ou "adequação" do membro i e m é a dimensão total da população, Lin and Hajela (1992).

A população assim reproduzida tem a mesma dimensão da inicial, mas incrementa a média dos valores da função objectivo.

O processo de *cruzamento* permite alterar as características dos membros da população, no sentido de serem potenciadas as mais importantes nas gerações seguintes. Este processo difere do de reprodução, pois altera os códigos da cadeia binária do membro da população (alterando-lhe as características e possibilitando a sua evolução), enquanto aquele apenas selecciona os mais "aptos" (mantendo as características inalteradas).

A operação de cruzamento é executada seleccionando aleatoriamente dois membros da população (pais) e definindo quais as posições na cadeia binária que vão ser

trocadas entre si (também de forma aleatória), obtendo-se novas cadeias da geração seguinte (filhos).

Para ilustrar este processo considerem-se as cadeias binárias de 10 dígitos:

Pai 1: 0 1 1 1 0 0 1 1 0 1

Pai 2: 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1

A partir desses "pais" e seleccionando aleatoriamente as posições da cadeia que serão alteradas, sejam as nº 4, 5 e 9 (acima sublinhadas), efectuem-se as trocas entre as duas cadeias, resultando:

Filho 1: 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1

Filho 2: 0 0 1 1 0 0 0 1 0 1

Outra forma de efectuar o cruzamento é indicada em Goldberg (1989), a qual consiste na troca da totalidade da cadeia a partir duma posição seleccionada. Considere-se, por exemplo, a posição 6 e os "pais" anteriormente referidos, com base nos quais se obtém como resultado deste tipo de cruzamento:

Filho 1: 0 1 1 1 0 0 | 0 1 1 1

Filho 2: 0 0 1 0 1 0 | 1 1 0 1

Por último, o processo de *mutação* consiste em mudar, nalguns membros da população, o valor binário de 0 para 1 (ou vice-versa) de uma posição na cadeia escolhida aleatoriamente.

Em Ulder et al (1991) é apresentado o seguinte esquema de procedimentos, geralmente utilizado neste tipo de abordagem:

1 - *Inicialização*: Construção de uma população inicial de soluções, composta pelos códigos binários de soluções iniciais.

2 - *Melhoramento 1*: Utilização de um algoritmo de pesquisa local para substituir cada solução da população corrente por outra solução melhor, ou seja, um óptimo local.

3 - *Recombinar*: Ampliar a população corrente por adição de soluções obtidas pela junção de duas ou mais soluções dessa população, através dos processos de reprodução, cruzamento e mutação.

4 - *Melhoramento 2*: Por métodos análogos aos utilizados no passo 2, substituir as soluções resultantes do passo 3 por soluções melhores (ótimos locais).

5 - *Seleccionar*: Reduzir a população ampliada à sua dimensão original, de acordo com regras da selecção pré-estabelecidas.

6 - *Evolução iterativa*: Repetir os passos 3 a 5 até ser atingido o critério de paragem definido.

Ulder et al (1991) referem que, na aplicação desta metodologia ao Problema do Caixeiro Viajante (PCV), as soluções iniciais (passo 1) são obtidas por qualquer um dos métodos construtivos de rota disponíveis e que nos processos de melhoramento (passos 2 e 4) é normalmente usada a heurística de Lin and Kernighan (1973), por ser a que melhores resultados produz na pesquisa das melhores soluções.

3.3 HEURÍSTICAS PARA RESOLUÇÃO DO PORV COM RESTRIÇÕES TEMPORAIS NOS CLIENTES

Efectua-se, neste ponto, uma revisão dos métodos desenvolvidos para a resolução de problemas de optimização que envolvem uma frota de M veículos sediados num único depósito, com restrições de capacidade e intervalos de tempo para cada cliente durante os quais são autorizadas as respectivas visitas, sendo conhecidas as procuras e localizações dos clientes e as capacidades dos veículos.

Neste tipo de problemas consideram-se factores quer espaciais (função das localizações dos clientes), quer temporais ("Janelas de Tempo" em cada cliente), pelo que os algoritmos a aplicar na sua resolução devem possuir essa dupla orientação, diferindo dos métodos para resolução do PORV base (apresentados nos pontos 3.1 e 3.2) cuja orientação é unicamente espacial.

Genericamente, são possíveis dois tipos de abordagem ao problema:

- 1) Incluir as restrições temporais na formalização inicial e resolver o problema tendo em conta, simultaneamente, quer os factores espaciais, quer os temporais.
- 2) Resolver o PORV sem restrições temporais e, a partir das soluções obtidas, realizar procedimentos de pós-optimização com orientação temporal para melhorar as soluções relativamente ao cumprimento das "Janelas de Tempo" nos clientes.

Os algoritmos seguidamente apresentados enquadram-se numa dessas duas categorias.

3.3.1 UMA HEURÍSTICA BASEADA NO MÉTODO DAS POUPANÇAS¹⁵

Esta abordagem, desenvolvida por Solomon (1987), é uma extensão da versão em paralelo do método originalmente proposto por Clarke and Wright (1964) (Ver ponto 3.2.1).

Para considerar os aspectos temporais nos clientes, este método propõe um limite ao tempo de espera, seja W , quando se efectua a ligação entre dois clientes, adoptando o seguinte procedimento:

Seja w_j o tempo de espera no cliente j resultante da ligação do cliente i ao cliente j e W um parâmetro (limite ao tempo de espera).

Se o método de Clarke and Wright, de orientação espacial, preconiza a ligação do cliente i ao j , essa ligação só será efectuada se $w_j < W$.

A heurística assim implementada evita a ligação entre dois clientes que possuam localizações muito próximas (cuja ligação conduziria a uma poupança elevada) mas que introduzam elevados tempos de espera. Assim, permite-se que o veículo efectue a visita a outro(s) cliente(s) em vez de esperar pela abertura de um cliente.

A cada passo da heurística, para além da verificação das restrições de capacidade dos veículos, também se verifica o cumprimento das "Janelas de Tempo" para cada cliente.

¹⁵ Savings

Devido à existência de "Janelas de Tempo", é necessário ter em conta a orientação das rotas geradas pois, por exemplo, as rotas $0-i-j-0$ e $0-j-i-0$ podendo ser consideradas idênticas quanto à distância percorrida, são distintas quanto ao tempo de chegada/partida a cada cliente.

3.3.2 UMA HEURÍSTICA DE INSERÇÃO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO, COM ORIENTAÇÃO TEMPORAL

A heurística de inserção do vizinho mais próximo, desenvolvida por Solomon (1987), inicia cada rota através da selecção do cliente "mais próximo" (medida que será definida abaixo) do Depósito Central, de entre os clientes "livres", i. é, que não fazem parte de alguma rota já existente.

A cada iteração subsequente, a heurística pesquisa o cliente "mais próximo" relativamente ao último introduzido na rota. Esta pesquisa é efectuada entre todos os clientes que, ao serem acrescentados à rota em construção, cumpram as restrições temporais e de capacidade, respectivamente dos clientes e veículos.

Uma nova rota é iniciada sempre que não seja possível introduzir na rota actual algum dos clientes "livres".

Nesta abordagem, a medida de "proximidade" de cada cliente considera as características geográficas e temporais do problema, sendo a sua definição a seguinte:

Seja i o último cliente na rota parcial e j um qualquer cliente "livre" que pode ser visitado a seguir.

A medida de "proximidade" (c_{ij}) usada é função da:

- 1) Distância entre os clientes, d_{ij}
- 2) Diferença de tempo entre a finalização do serviço no cliente i e o início do serviço no cliente j , T_{ij} .
- 3) "Urgência" em servir o cliente j , v_{ij} , expressa pelo tempo restante até ser possível iniciar a visita a esse cliente.

A apresentação formal desta medida vem:

$$c_{ij} = \partial_1 d_{ij} + \partial_2 T_{ij} + \partial_3 v_{ij}$$

com:

$$T_{ij} = b_j - (b_i + s_i)$$

$$v_{ij} = l_j - (b_i + s_i + t_{ij})$$

$$\partial_1 + \partial_2 + \partial_3 = 1$$

em que:

b: Tempo de início do serviço

s: Tempo de execução do serviço

l: Tempo limite para se iniciar o serviço

t: Tempo de trajecto

$$\partial_1, \partial_2 \text{ e } \partial_3 \geq 0$$

3.3.3 OUTRAS HEURÍSTICAS DE INSERÇÃO

Solomon (1987) apresenta ainda outras heurísticas de inserção, as quais podem ser consideradas como generalizações da heurística de inserção do vizinho mais próximo com orientação temporal, referida no ponto anterior.

A diferença reside no facto de ser permitida a inserção (se admissível) de um cliente "livre" entre um qualquer par de clientes da rota em construção, em vez de obrigatoriamente ser colocado no fim da cadeia de clientes da rota.

Outra heurística de inserção baseada na heurística de Solomon (ponto 3.3.2) é implementada em Foisy and Potvin (1993). Nesta, é utilizada uma abordagem de inserção paralela (em vez de sequencial) e estabelecida uma nova medida para seleccionar o próximo cliente a inserir nas rotas.

3.3.4 UMA HEURÍSTICA DE "VARRIMENTO"¹⁶ COM ORIENTAÇÃO TEMPORAL

Este é um método que decompõe o Problema de Optimização de Rotas de Veículos com "Janelas de Tempo" (PORVJT) em duas fases, realizando-se na primeira a afectação dos clientes aos veículos, como na heurística original de Gillet and Miller (Ver ponto 3.2.2.1), e na segunda a sequência pela qual deverão ser servidos os clientes, através de uma heurística construtiva de rota.

Devido à existência de restrições temporais, alguns clientes afectos a um veículo podem não ser servidos. Nesta situação, o método desenvolvido por Solomon (1987) propõe que se repitam os procedimentos de afectação e sequenciação dos clientes nas rotas, utilizando clientes não servidos como "sementes".

O processo iterativo continua até que todos os clientes sejam servidos, cumprindo as restrições de capacidade dos veículos e as "Janelas de Tempo" nos clientes.

3.3.5 MÉTODO DE AFECTAÇÃO GENERALIZADA PARA O PORVJT

A abordagem baseada na afectação generalizada, proposta por Fisher e Jaikumar (Ver ponto 3.2.2.3), para a resolução do PORV está na origem do desenvolvimento deste método de resolução do PORVJT.

Nygaard et al (1988) propõem a seguinte metodologia:

- 1) Resolução do problema ignorando as restrições temporais, através da utilização, por exemplo, da heurística de duas fases de Fisher and Jaikumar.
- 2) Verificar se existem clientes para os quais não são cumpridas as respectivas "Janelas de Tempo". Se sim, passos seguintes. Caso contrário, termina.
- 3) *Procedimento "intra-rota"*: Efectuar trocas entre clientes da mesma rota e verificar se são cumpridos os tempos para todos eles. Se não, passo seguinte.

¹⁶ Sweep

4) *Procedimento "inter-rota"*: Efectuar trocas de clientes (para os quais não se cumprem os tempos limites) de uma rota por outros de outras rotas, se forem cumpridos ou melhorados os tempos nos clientes.

Caso hajam clientes onde não são cumpridos os tempos, passo seguinte.

5) *Alteração das "sementes"*: Efectuar a mudança da localização das "sementes", através de um dos seguintes modos:

- Deslocamento da "semente" em direcção aos clientes com "Janelas de Tempo" não cumpridas, para cada rota.
- Idem, na direcção contrária.
- Simples rotação das "sementes" de todas as rotas.

e aplicar a heurística inicial de duas fases para as novas localizações.

De referir que, na aplicação prática realizada e apresentada no ponto 4, foi utilizado este método para a obtenção de soluções que contemplem as "Janelas de Tempo" de cada Centro de Distribuição Postal (CDP) a servir.

3.3.6 OUTROS ALGORITMOS

Os métodos heurísticos atrás referidos foram desenvolvidos para a resolução do Problema de Optimização de Rotas de Veículos com "Janelas de Tempo" (PORVJT). No entanto, grande investigação tem sido realizada sobre algumas variantes ao problema ou no desenvolvimento de métodos exactos de resolução, pelo que se apresentam neste ponto, alguns exemplos que para além de considerarem as restrições temporais nos clientes, são orientados para outro objectivo, ou consideram simultaneamente outras restrições adicionais, ou ainda resolvem o problema de forma exacta.

Desrochers et al (1992) apresentam um *método exacto* para a resolução do PORVJT que utiliza a abordagem de geração de colunas, usando a programação dinâmica na resolução do problema do caminho mais curto com restrições de capacidade e temporais nos clientes.

Desrosiers et al (1988) apresentam um método de relaxação lagrangeana para a resolução do PORVJT, em que se focaliza como objectivo a determinação da *dimensão mínima (ótima) da frota*.

São referidos em Dumas et al (1991) e Derigs and Metz (1992) algoritmos para a resolução do problema da distribuição e recolha de produtos com "Janelas de Tempo", o qual envolve *restrições de precedência entre os clientes*, para além das restrições "normais" do PORVJT base.

Em Balakrishnan (1993) são descritas heurísticas que possibilitam a violação das "Janelas de Tempo" nos clientes, através da associação de uma *penalidade*, caso o cliente não seja servido no intervalo de tempo pré-definido.

Refira-se, por último, que Solomon and Desrosiers (1988) e Haouari et al (1990) efectuem revisões bibliográficas dos métodos exactos e heurísticos para a resolução do PORVJT, bem como das várias abordagens existentes para o problema.

3.4 PROCESSAMENTO PARALELO

Recentemente, têm sido desenvolvidas técnicas de processamento paralelo com o objectivo de melhorar o tempo computacional necessário para a resolução do PORV. Foisy and Potvin (1993) apresentam uma heurística de inserção e implementam uma técnica de processamento paralelo (que seguidamente se descreve) na resolução do PORVJT.

Como foi referido no ponto 3.3.3, esta heurística tem por base o método de inserção proposto por Solomon, do qual se distingue devido ao estabelecimento de uma nova medida para seleccionar o próximo cliente a inserir na rota e pela construção das rotas em simultâneo (*versão em paralelo*).

Em cada passo, há necessidade de calcular o custo mínimo de inserção de cada cliente em cada rota, de modo a identificar quer o próximo cliente a inserir, quer em que rota e posição deverá ser incluído.

A abordagem (*processamento paralelo*) proposta por Foisy and Potvin (1993) para minorar o tempo gasto na execução das tarefas precedentes, consiste em distribuir o conjunto de clientes não afectos a alguma rota pelos processadores disponíveis, o que

possibilita a distribuição das "tarefas de cálculo" da medida utilizada no processo de inserção pelo n^o de processadores utilizados.

Com base neste cenário, cada processador, individualmente, executa o cálculo do custo mínimo de inserção dos clientes pertencentes ao subconjunto que lhe está afecto, identificando o cliente (desse subconjunto) de menor "custo de inserção". No final desta etapa, cada processador identificou um cliente distinto para a próxima inserção.

Um dos processadores (previamente definido, seja o processador n^o 1) executa então um programa especial para realizar a selecção final do cliente a inserir, com base nas mensagens recebidas de cada processador do sistema que contém informação sobre:

- O melhor cliente
- O valor da "medida de inserção" associada a esse cliente
- O melhor local de inserção
- Identificação do processador emissor da mensagem

O processador n^o 1 compara os valores da "medida de inserção" recebidos de cada um dos outros processadores, de modo a seleccionar o melhor cliente e o seu melhor local de inserção, actualizar a rota respectiva e enviar para todos os processadores essa informação. Neste ponto, cada um dos processadores actualiza a solução, através da introdução do cliente seleccionado na rota e posição estabelecidas.

O procedimento descrito repete-se até não existirem clientes "livres", ou seja, até todos os clientes serem affectos a alguma rota.

Fiechter et al (1992) referem a utilização de dois tipos de processamento paralelo em conjunto com a técnica de Pesquisa Tabu (ponto 3.2.4).

O primeiro consiste em paralelizar a pesquisa do próximo movimento a realizar, desde que o conjunto de movimentos possíveis possa ser particionado em p subconjuntos, sendo cada um explorado por um dos p processadores disponíveis. O melhor movimento, de entre os p movimentos encontrados por cada processador, é executado.

Um segundo tipo de processamento paralelo (que depende do tipo de problema) é realizado através da partição do problema inicial em vários "subproblemas" independentes, efectuando-se simultaneamente (com cada processador) os vários movimentos, em cada um dos subconjuntos obtidos. A solução global é obtida através da junção de todas as "subsoluções" encontradas.

Salienta-se, por fim, que a apresentação das metodologias efectuada no presente capítulo não é, de forma alguma, exaustiva. Encontram-se referidos na literatura inúmeros métodos "alternativos" para as várias abordagens aos problemas, nas quais são utilizados refinamentos das técnicas utilizadas nos procedimentos de optimização ou consideradas restrições e/ou extensões adicionais aos problemas base.

Conforme foi referido no início deste capítulo, a revisão bibliográfica aqui efectuada teve como objectivo permitir uma visão abrangente e geral das abordagens e métodos propostos para a resolução dos problemas e não a descrição em profundidade das diversas variantes existentes.

4. APLICAÇÃO PRÁTICA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE TRANSPORTES POSTAIS

A aplicação prática posteriormente descrita (ponto 4.2) centra-se na Optimização das Rotas dos Veículos da Rede Secundária da Região Sul dos Correios (CTT).

No sentido de enquadrar na Rede Nacional apresenta-se, seguidamente, uma breve caracterização da Empresa e da respectiva estrutura organizativa de distribuição e recolha.

Os CTT são uma Empresa Pública que opera primordialmente no sector de actividade de recolha e distribuição de correspondência (em regime de monopólio) e de encomendas.

Para a apresentação da estrutura de transportes adoptada pela Empresa é necessário definir, previamente, os conceitos utilizados, referindo-se abaixo os mais relevantes, na óptica da distribuição.

1) **Correio:** Considera-se que engloba a totalidade da *correspondência* e as *encomendas postais*.

2) **Giro:** Percurso de distribuição ou recolha realizado por um Carteiro (CRT).

3) **Centro de Tratamento de Correio (CTC):** Unidade regional onde é centralizado (e tratado) o Correio. Os CTC's funcionam como "portas de entrada/saída" do Correio na Região que lhes está afecta, existindo tantos CTC's quantas as Regiões pré-definidas para o Território.

4) **Centro de Distribuição Postal (CDP):** Estação de Correios onde está sediado um número não nulo de Carteiros.

Para cumprir os seus objectivos, a Empresa organizou a sua estrutura de distribuição com base em três tipos de Redes Rodoviárias de Transporte, nomeadamente:

- **Rede Primária:** Efectua as ligações entre os Centros de Tratamento de Correio (CTC) das várias Regiões existentes.

- **Rede Secundária:** Executa as ligações entre o CTC de uma Região e os Centros de Distribuição Postal (CDP) abrangidos por esse CTC.
- **Rede Terciária:** Para cada CDP, realiza a distribuição e/ou recolha do Correio aos consumidores e/ou receptáculos (Giros).

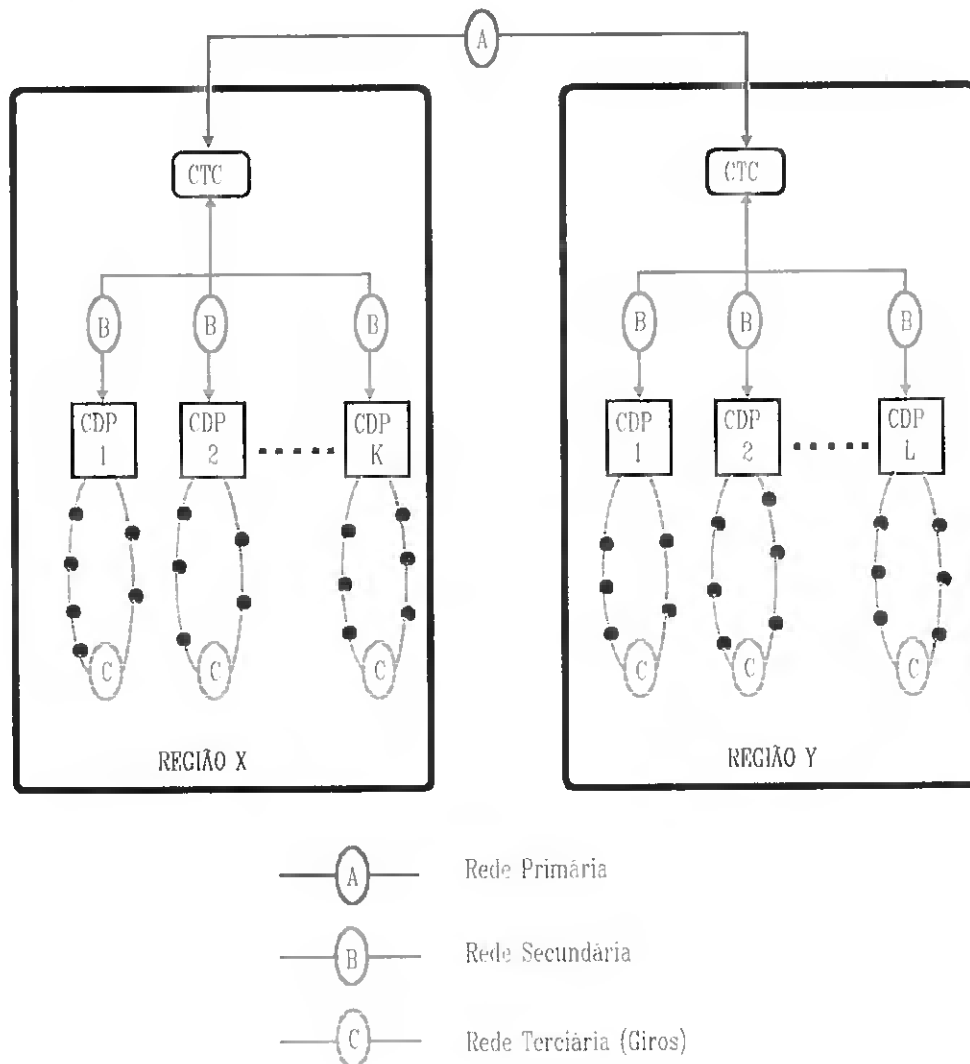


FIGURA 4.1

4.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Como anteriormente se referiu, o Problema a resolver é o de Optimizar a Rede Secundária da Região Sul dos CTT.

Essa Região engloba todos os CDP's do Algarve e ainda os CDP's de Cercal, Santa Clara-a-Velha, Vila Nova de Milfontes e Odemira da zona Litoral Alentejana, num total de 23 "clientes".

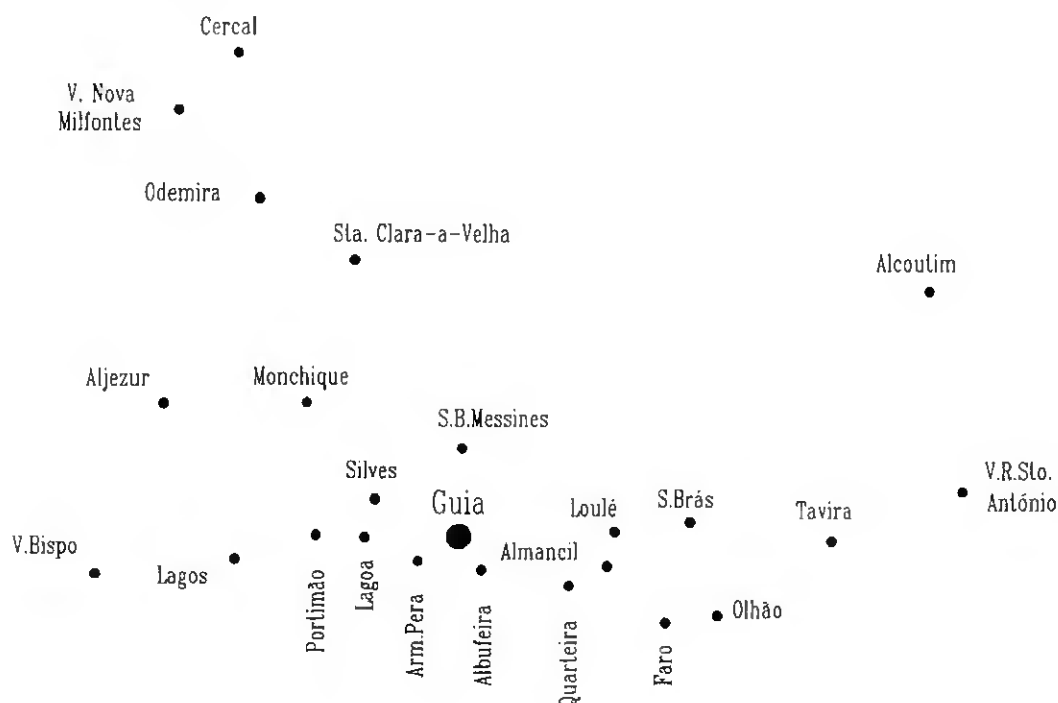


FIGURA 4.2: CDP's abrangidos pela Região Sul

As trocas de Correio (expedição ou recepção) intra e inter-regionais realizam-se num único ponto - o entreposto da Guia (CTC), local onde é concentrado todo o Correio com origem ou destino na Região.

O Problema consiste na determinação das rotas de menor custo a realizar para servir todos os 23 CDP's, através de uma frota existente de 5 viaturas sediada no CTC da Guia (Depósito Central). São conhecidas as localizações geográficas do Depósito e dos clientes, as procuras (tráfego de Correio) dos CDP's, bem como as capacidades das viaturas.

Adicionalmente, pretende-se que a *qualidade de serviço* prestado seja elevada, o que pressupõe que a distribuição domiciliária (Giros da Rede Terciária) do Correio se inicie o mais cedo possível. Esta situação impõe o estabelecimento de limites

horários para a recepção do Correio (proveniente da Guia) em cada CDP, de modo a garantir um determinado *padrão de qualidade*, a definir posteriormente.

Os métodos a adoptar para a resolução do Problema devem ter em conta tanto a minimização das distâncias percorridas pelas rotas como os limites horários referidos, pelo que se considera este Problema como pertencendo ao grupo dos Problemas de Optimização de Rotas de Veículos com Restrições Temporais nos Clientes (PORVJT).

O Problema genérico atrás referido tem, no entanto, duas variantes independentes com condicionantes distintas, as quais seguidamente se analisam e expõem.

A primeira é denominada por *Dispersão* e consiste na distribuição do Correio aos CDP's da Região durante o período da madrugada e manhã. O tráfego com destino a esses CDP's, independentemente da sua origem, foi previamente concentrado na Guia, daí partindo as viaturas que procedem à sua distribuição.

Para cada um desses CDP's existe uma hora máxima de recepção do Correio que depende dos seguintes factores:

- **Qualidade de Serviço:** De acordo com a troca de impressões mantida com a Direcção Regional de Correios do Algarve (DRCA), na pessoa do seu Director Regional Eng. Luís Andrade, estabeleceu-se como padrão de qualidade a atingir, iniciarem-se todos os giros da Rede Terciária da Região às 9 h 30 m (no máximo).
- **Volume de Tráfego:** Quanto maior for o volume de tráfego de Correio de um CDP, maior será o tempo necessário ao seu tratamento. Apresentam-se, no Anexo 1A, os tráfegos médios de correspondência e encomendas para cada CDP.
- **Dotação de Carteiros:** Em cada CDP existe um número fixo de pessoas (Ver Anexo 1B) que executam as tarefas de organização do Correio necessárias à sua posterior distribuição.
- **Tempos de Tratamento do Correio:** Sobre o Correio que chega a um CDP executam-se dois tipos de operações que antecedem o início da distribuição domiciliária, nomeadamente, a *Separação Geral* que consiste na divisão do Correio pelos Giros existentes (em função dos destinatários) e o *Arruamento* que, para cada Giro, ordena sequencialmente os objectos a distribuir (em função

do percurso do Giro). Os tempos necessários para executar estas duas tarefas são calculados com base nos tempos de trabalho por operação definidos pela Empresa (Ver Anexo 1C) e dependem, quer do número de objectos a tratar (tráfego do CDP), quer do número de Carteiros (CRT) existentes no CDP (Dotação de Carteiros).

Considerando os factores acima enumerados, a Hora Limite de Recepção do Correio em cada um dos 23 CDP's é então determinada subtraindo à Hora de Início dos Giros (pré-definida às 9 h 30 m) o tempo necessário para realizar as operações de tratamento prévio (Separação Geral + Arruamento).

Da exposição anterior infere-se que as "Janelas de Tempo" nos Clientes (CDP's) são uma das principais condicionantes a ter em conta no Problema de distribuição a realizar no período da manhã (*Dispersão*).

Por outro lado, a segunda variante independente do Problema, designada por *Concentração*, consiste na recolha (a efectuar durante a tarde), em cada um dos CDP's, do Correio que neles tem origem e se destina quer às outras Regiões como aos restantes Centros de Distribuição Postal da Região Sul.

Neste caso, trata-se de recolher o Correio nos CDP's e concentrá-lo no CTC da Guia, processo este contrário ao de *Dispersão*.

A Qualidade de Serviço está aqui associada à Hora de Corte (ou fecho) ao público de aceitação do Correio por cada CDP e é tanto maior quanto mais tarde aquela for fixada (o que possibilita aos utentes efectuarem o envio do respectivo Correio num período posterior, mantendo-se o prazo de entrega no destinatário).

No entanto, a Qualidade de Serviço Global está condicionada aos horários de partida pré-fixados (Ver Anexo 1D) para as carreiras da Rede Primária (RP), que se iniciam no CTC da Guia, em direcção às outras Regiões.

É de referir que, no tratamento do Problema de Optimização das Rotas da Rede Secundária da Região Sul, os horários de partida e chegada ao CTC da Guia das carreiras da RP são considerados rígidos, devido ao facto de que qualquer alteração introduzida nesses horários interferiria com a restante Rede de Distribuição Nacional.

No Problema de Concentração trata-se, pois, de otimizar as rotas dos veículos, tendo em atenção que cada rota se deve iniciar de forma a que a soma da sua Hora de Início com os Tempos de Trajecto (Guia-CDP's-Guia), de Cargas e Descargas e de Manipulação no Depósito Central não possa exceder a Hora de Partida das viaturas que compõem a Rede Primária.

Esta restrição impõe, por via indirecta, as Horas de Fecho em cada CDP e, conseqüentemente, o *padrão de qualidade de serviço* possível, face à rigidez das ligações inter-regionais.

Da apresentação precedente conclui-se que a tipologia do Problema de *Dispersão* é distinta do de *Concentração*, pois enquanto no primeiro a orientação temporal ("Janelas de Tempo" nos Clientes) é de capital importância, no segundo esse tipo de restrições não existem.

Assim, a implementação computacional posteriormente descrita (Ponto 4.4) é desenvolvida e dirigida para a resolução do Problema de Dispersão, por este envolver Restrições Temporais adicionais ao Problema de Optimização de Rotas de Veículos (PORV) clássico.

Contudo, em virtude das metodologias aí adoptadas resolverem, inicialmente, o PORV sem Restrições Temporais (Nygard et al (1988)), foram também aplicadas à resolução do Problema de Concentração não sendo, nesse caso, executada a parte de pós-optimização com orientação temporal dos algoritmos.

4.3 TRATAMENTO DOS DADOS

Os valores médios (históricos) e restantes elementos recolhidos na Direcção Regional de Correios do Algarve (DRCA) sobre a Rede Secundária da Região Sul da Empresa (Anexo 1), foram "transformados" e organizados de modo a permitirem a sua utilização nos algoritmos utilizados.

O objectivo deste ponto é o de explicitar a forma como esses elementos foram tratados, bem como evidenciar os pressupostos adoptados na sua definição.

4.3.1 LOCALIZAÇÃO DO DEPÓSITO CENTRAL E CDP'S

As localizações do Depósito Central (Guia) e dos 23 CDP's englobados pela Região Sul foram determinadas através da utilização de um mapa rodoviário (Anexo 2) e de

um sistema de eixos cartesiano cuja origem coincide com a localização da Guia $[(x_0, y_0) = (0,0)]$ e cujo eixo das abcissas passa pelo CDP de Tavira, ou seja, $y_{Tavira} = 0$.

As coordenadas de cada CDP são indicadas, no quadro seguinte, de duas formas:

- 1) Medidas sobre a planta, em função do sistema de eixos adoptado e cotadas em [mm].
- 2) Conversão das medidas obtidas em 1) para [Km], atendendo a que a escala do mapa referido é $10 \text{ mm} \equiv 6 \text{ Km}$.

LOCALIDADES	COORDENAD. [mm]		COORDENAD. [Km]	
	X	Y	X	Y
0 - GUIA	0	0	0	0
1- ALBUFEIRA	7	- 7.5	4.2	-4.5
2 - ALCOUTIM	120.5	63	72.3	37.8
3 - ALJEZUR	- 73	34.5	- 43.8	20.7
4 - ALMANCIL	39	- 7	23.4	- 4.2
5 - ARMAÇÃO PERA	- 9	- 5	- 5.4	- 3
6 - CERCAL	- 54	123.5	- 32.4	74.1
7 - FARO	54	- 21	32.4	- 12.6
8 - LAGOA	- 23	1	- 13.8	0.6
9 - LAGOS	- 55.5	- 4.5	- 33.3	- 2.7
10 - LOULÉ	41	2.5	24.6	1.5
11 - MONCHIQUE	- 37.5	35	- 22.5	21
12 - ODEMIRA	- 49	87	- 29.4	52.2
13 - OLHÃO	67	- 19	40.2	- 11.4
14 - PORTIMÃO	- 35	2	- 21	1.2
15 - QUARTEIRA	29	- 11	17.4	- 6.6
16 - S. BRÁS	60	4.5	36	2.7
17 - ST. CLARA	- 25	71	- 15	42.6
18 - S.B.MESSINES	2	23.5	1.2	14.1

(CONTINUAÇÃO)

LOCALIDADES	COORDENAD. [mm]		COORDENAD. [Km]	
	X	Y	X	Y
19 - SILVES	- 20.5	11	- 12.3	6.6
20 - TAVIRA	96	0	57.6	0
21 - V.N.MILFONTES	- 69.5	109.5	- 41.7	65.7
22 - V.R.S. ANTÓNIO	129	12.5	77.4	7.5
23 - V.BISPO	- 90	- 8	- 54	- 4.8

QUADRO 4.1: Coordenadas das localidades

4.3.2 DISTÂNCIAS ENTRE CLIENTES

Através da rede rodoviária existente (expressa no mapa apresentado no Anexo 2) determinaram-se as distâncias reais entre os vários CDP's e estes e o Depósito, as quais verificam a desigualdade triangular:

$$d_{ik} \leq d_{ij} + d_{jk} \quad \forall i, j, k \in \{CDP's\}$$

em que:

d_{ik} é a distância entre os clientes i e k

A utilização destas distâncias nos algoritmos conduz a soluções reais para o Problema em causa, no entanto, o mesmo Problema foi também resolvido com utilização de distâncias euclidianas (calculadas pelos algoritmos utilizados, com base nas coordenadas cartesianas dos clientes e do Depósito), de modo a poderem ser comparadas as soluções obtidas para um e outro caso.

Na Figura 4.3 apresentam-se as ligações rodoviárias existentes, para as quais se referem as correspondentes distâncias reais e euclidianas e as respectivas variações percentuais relativas no Quadro 4.2.

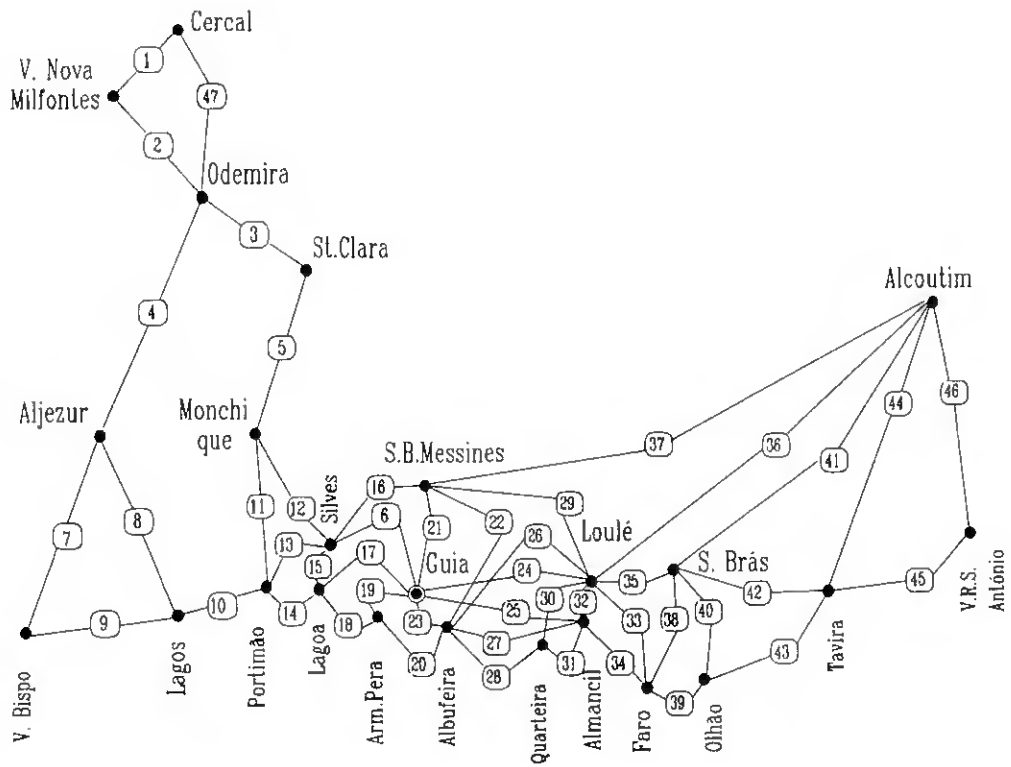


FIGURA 4.3

No Quadro seguinte considera-se que:

Ligações: As representadas na Figura 4.3.

Mapa [Km]: Distância obtida no mapa apresentado no Anexo 2.

$f(x,y)$ [Km]: Distância calculada através da expressão:

$$\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad \forall i, j \in \{CDP's, CTC\}$$

VAR [%]: Calculada pela expressão: $\frac{Distância[f(x,y)]}{Distância[Mapa]} \times 100\%$

LIGA- ÇÕES	MAPA [Km]	f(x,y) [Km]	VAR [%]	LIGA- ÇÕES	MAPA [Km]	f(x,y) [Km]	VAR [%]
1	15	12.5	83	24	28	24.6	88
2	23	18.3	80	25	27	23.8	88
3	31	17.3	56	26	27	21.3	79
4	42	34.6	82	27	25	19.2	77
5	33	22.9	69	28	19	13.4	71
6	22	14	64	29	37	26.6	72
7	33	27.5	83	30	11	10.8	98
8	30	25.6	85	31	7	6.5	93
9	23	20.8	90	32	7	5.8	83
10	21	12.9	61	33	17	16.1	95
11	25	19.9	80	34	12	12*	100
12	29	17.7	61	35	13	11.5	88
13	17	10.2	60	36	75	59.9	80
14	9	7.2	80	37	83	75	90
15	8	6.2	78	38	17	15.7	92
16	17	15.4	91	39	8	7.9	99
17	15	13.8	92	40	22	14.7	67
18	10	9.1	91	41	71	50.5	71
19	8	6.2	78	42	22	21.8	99
20	12	9.7	81	43	21	20.8	99
21	15	14.2	95	44	58	40.6	70
22	25	18.8	75	45	23	21.2	92
23	6	6*	100	46	44	30.7	70
				47	27	22.1	82

QUADRO 4.2: Comparação entre as Distâncias Reais e Euclidianas para as ligações rodoviárias existentes

(*) Valor calculado superior ao "lido" no mapa \Rightarrow Situação impossível.

As diferenças são de poucas décimas e devem-se à precisão de leitura no mapa. Os valores assinalados foram truncados.

Da análise do Quadro anterior, verifica-se que a variação entre as distâncias reais e euclidianas é significativa e não uniforme (de 56% a 100%), pelo que não é possível o seu relacionamento através de um factor de escala.

Para a utilização das distâncias reais nos algoritmos é necessário calcular as distâncias entre cada CDP e todos os restantes (incluindo o Depósito), o que foi efectuado com base na rede de ligações de distância mínima (Figura 4.3), resultando a matriz apresentada no Quadro 4.3 (página 54) na qual, por exemplo, a distância entre Monchique e Aljezur é obtida pela soma das distâncias entre Monchique → Portimão → Lagos → Aljezur.

De referir ainda que a matriz de distâncias apresentada é triangular devido à simetria do Problema, ou seja, considera-se que:

$$\forall i, j \quad d_{ij} = d_{ji}$$

em que d_{ij} é a distância a percorrer no sentido de i para j .

MATRIZ DE DISTÂNCIAS ENTRE TODAS AS LOCALIZAÇÕES

0 - DEPÓSITO (GUIA)
1 - ALBUFEIRA
2 - ALCOUTIM
3 - ALJEZUR
4 - ALMANCIL
5 - ARMAÇÃO PERA
6 - CERCAL
7 - FARO
8 - LAGOA
9 - LAGOS
10 - LOULE
11 - MONCHIQUE
12 - ODEMIRA
13 - OLHAO
14 - PORTIMAO
15 - QUARTEIRA
16 - SÃO BRÁS ALPORTEL
17 - Sta. CLARA-A-VELHA
18 - S. BART. MESSINES
19 - SILVES
20 - TAVIRA
21 - V. N. MILFONTES
22 - V. R. Sto. ANTÓNIO
23 - VILA DO BISPO

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
6	98	75	27	8	142	39	15	45	28	51	115	47	24	25	41	84	15	22	63	138	86	68	
-	102	86	25	12	148	37	21	51	27	57	121	45	30	19	40	90	25	28	62	144	85	74	
-	-	168	82	111	220	87	108	138	75	129	193	79	117	89	71	162	83	100	58	216	44	161	
-	-	-	102	70	69	114	60	30	103	76	42	122	51	100	116	73	85	68	138	65	161	33	
-	-	-	-	37	169	12	42	72	7	78	142	20	51	7	20	111	42	49	41	165	64	95	
-	-	-	-	-	138	47	10	40	36	47	111	55	19	31	49	80	23	18	76	134	99	63	
-	-	-	-	-	-	181	125	99	170	91	27	189	116	167	183	58	137	120	205	15	228	102	
-	-	-	-	-	-	-	54	84	17	90	154	8	63	19	17	123	54	61	29	177	52	107	
-	-	-	-	-	-	-	-	30	43	34	98	62	9	40	56	67	25	8	83	121	106	53	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	73	46	72	92	21	70	86	79	55	38	113	95	136	23	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	79	143	25	52	11	13	112	37	50	35	166	58	96	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	64	98	25	76	92	33	46	29	114	87	137	69	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	162	89	140	156	31	110	93	178	23	201	75	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	71	27	22	131	62	69	21	185	44	115	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49	65	58	34	17	87	112	110	44	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24	109	40	47	48	163	71	93	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125	50	63	22	179	45	109
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	79	62	147	54	170	102
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17	72	133	95	78
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	85	116	108	61
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	201	23	131
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	224	98
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	154
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

QUADRO 4.3: Distâncias kilométricas entre CDP's e Depósito, em função da Rede Rodoviária existente

4.3.3 CAPACIDADE VOLUMÉTRICA DAS VIATURAS DA FROTA

A distribuição de Correio pelos CDP's da Região Sul é realizada por 5 viaturas, baseadas no CTC da Guia, cujas capacidades (Ver Anexo 1D) são:

- 4 veículos de 23 m³
- 1 veículo de 45 m³

Na aplicação implementada considerou-se que a frota é homogénea e que a capacidade de cada um dos 5 veículos é igual a 23 m³, verificando-se que, nesse caso, a relação entre a procura total (64.95 m³) e a capacidade disponível (115 m³) é de aproximadamente 56%, o que revela a existência de uma "folga" elevada (capacidade não utilizada), pelo que se entendeu desnecessária a utilização de uma viatura de maior capacidade (a de 45 m³).

Esta ideia é reforçada pelo facto das Restrições Temporais se poderem considerar suficientemente "apertadas" no sentido de impossibilitarem que um mesmo veículo sirva um elevado número de clientes (CDP's) e, conseqüentemente, conduzem a que o "peso" de cada rota se situe em níveis abaixo dos 23 m³ de capacidade máxima adoptados para cada viatura, como se poderá observar nos resultados obtidos (Ver ponto 4.5).

4.3.4 TRÁFEGO MÉDIO DE CORREIO EM CADA CDP (PROCURA)

O tráfego total de cada CDP determina-se através da soma das parcelas relativas à *correspondência* e às *encomendas postais*. A informação disponível (Anexo 1A) refere-se à média diária do número de objectos por CDP, no entanto, é importante definir a procura individual em termos de volume ocupado e não do seu número, devido à necessária compatibilização com as capacidades volumétricas conhecidas das 5 viaturas que executam a sua distribuição.

Com base nos elementos relativos ao n^o médio diário de objectos (correspondência e encomendas), tipologia e respectivas dimensões, disponibilizados pela Empresa (Ver Anexo 1A), procedeu-se do seguinte modo:

4.3.4.1 CORRESPONDÊNCIA

A correspondência pode ser dividida em dois grupos:

- Finos : Composta pela correspondência pessoal e institucional (extractos bancários, avisos de pagamento, etc.)
- Grossos : Composta por "mailings", revistas, jornais, etc.

Na Região Sul a percentagem média de tráfego para cada um destes grupos é:

CORRESPONDÊNCIA	PERCENTAGEM (%)
FINOS	75
GROSSOS	25

QUADRO 4.4

e o seu transporte realiza-se em unidades modulares, denominadas *cassetes*, cujas dimensões e capacidades são:

TIPO DE CASSETE	DIMENSÕES [Cm]	CAPACIDADE [UNID.]		
		MIN	MÁX	MÉD
FINOS MOD. T11	13 X 28 X 50	550	700	625
GROSSOS MOD. T215	30 X 34 X 50	300	400	350

QUADRO 4.5

A conversão dos valores relativos ao tráfego de correspondência obtêm-se pela expressão:

$$\text{Vol. Corresp. /CDP [m}^3\text{]} = \left(\frac{\text{N}^\circ \text{ Obj. Total}}{\text{Cap. Méd. Cassete finos}} \right) \times \text{Vol. Cas. Finos} \times 75\% +$$

$$+ \left(\frac{\text{N}^\circ \text{ Obj. Total}}{\text{Cap. Méd. Cassete Grossos}} \right) \times \text{Vol. Cas. Grossos} \times 25\% \quad (4.1)$$

4.3.4.2 ENCOMENDAS

A tipologia (não normalizada) das encomendas distribuídas pela Empresa é bastante diversificada e a determinação dos respectivos volumes exige o conhecimento do espectro total dos vários tipos existentes, bem como do número de objectos manipulados de cada tipo, não se encontrando disponível essa informação.

Assim, nos procedimentos seguintes, consideram-se dois tipos de encomendas - *pequenas* e *grandes* - em que cada um deles é definido pela tipologia média do grupo que representa.

No quadro abaixo apresentam-se as dimensões médias de cada um dos dois tipos de encomendas considerados, a percentagem média de tráfego de cada um deles e os correspondentes volumes médios unitários.

TIPO DE ENCOMENDA	DIMENSÕES MÉDIAS [Cm]	PERCENTAGEM DE TRÁFEGO [%]	VOLUME MÉD. UNIT. [m ³]
PEQUENAS	15 x 25 x 35	75	0.013125
GRANDES	25 x 35 x 50	25	0.043750

QUADRO 4.6

Com base na tipologia de encomendas definida, calcula-se o volume ocupado pela quantidade média de encomendas de cada CDP através da expressão:

$$\text{Vol. Encom./CDP [m}^3\text{]} = \left(\begin{array}{c} \text{Volume M\u00e9dio} \\ \text{Unit. Ponderado} \\ \text{[m}^3\text{]} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{N}^\circ \text{ Encomendas} \\ \text{do CDP} \end{array} \right) \quad (4.2)$$

em que:

$$\begin{aligned} \text{Vol. m\u00e9d. unit. ponderado} &= \left(\begin{array}{c} \text{Vol. M\u00e9d. Unit.} \\ \text{Enc. Pequenas} \end{array} \right) \times 75\% + \\ &+ \left(\begin{array}{c} \text{Vol. M\u00e9d. Unit.} \\ \text{Enc. Grandes} \end{array} \right) \times 25\% \end{aligned}$$

4.3.4.3 TR\u00c1FEGO TOTAL

A utiliza\u00e7\u00e3o das express\u00f5es (4.1) e (4.2) permitem calcular o volume m\u00e9dio de Correio dirigido a cada CDP (procura), o qual se sintetiza no seguinte quadro:

	VOLUME DE TR\u00c1FEGO [m ³]		
	CORRES- POND\u00caNCIA	ENCOMEN- DAS	TOTAL
1- ALBUFEIRA	1.049	3.845	4.894
2 - ALCOUTIM	0.052	0.104	0.156
3 - ALJEZUR	0.083	0.374	0.457
4 - ALMANCIL	0.277	1.081	1.358
5 - ARMA\u00c7\u00c3O PERA	0.270	1.662	1.932
6 - CERCAL	0.069	0.436	0.505
7 - FARO	1.599	8.874	10.473
8 - LAGOA	0.378	1.850	2.228
9 - LAGOS	0.646	3.450	4.096
10 - LOUL\u00c9	0.799	4.468	5.267
11 - MONCHIQUE	0.120	0.665	0.785
12 - ODEMIRA	0.265	2.681	2.946
13 - OLH\u00c3O	0.719	3.990	4.709

(CONTINUAÇÃO)

	VOLUME DE TRÁFEGO [m ³]		
	CORRESPONDÊNCIA	ENCOMENDAS	TOTAL
14 - PORTIMÃO	1.296	9.185	10.481
15 - QUARTEIRA	0.406	2.307	2.713
16 - S. BRÁS	0.167	0.873	1.040
17 - ST. CLARA	0.034	0.208	0.242
18 - S.B.MESSINES	0.190	0.665	0.855
19 - SILVES	0.194	1.455	1.649
20 - TAVIRA	0.501	3.637	4.138
21 - V.N.MILFONTES	0.051	0.208	0.259
22 - V.R.S. ANTÓNIO	0.432	2.307	2.739
23 - V.BISPO	0.097	0.935	1.032

QUADRO 4.7: Tráfegos em Volume

4.3.5 HORAS LIMITE DE RECEPÇÃO DO CORREIO

Por forma a garantir a qualidade de serviço estipulada (início dos Giros da Rede Terciária às 9 h 30 m) é inicialmente determinado o tempo necessário para as operações que antecedem a distribuição domiciliária, o qual é deduzido à hora prevista para iniciar os Giros, encontrando-se assim a Hora Limite de recepção do Correio em cada um dos CDP's.

Como anteriormente se referiu, o tempo de tratamento de Correio nos CDP's depende da quantidade de objectos e do número de Carteiros (CRT) afectos às tarefas de Separação Geral e de Arruamento, efectuando-se a sua determinação como segue.

A partir do tráfego total do CDP (em quantidade) efectua-se a sua conversão no tempo necessário para a realização da Separação Geral (SG), através da aplicação do coeficiente indicado no Anexo 1C:

$$\text{Tempo}_{sg} [\text{Min}] = \left(\underbrace{0.054}_{\text{coeficiente}} \right) \times N^{\circ} \text{ Objectos}$$

Conhecida a dotação de CRT de cada CDP (Anexo 1B), divide-se o tempo total necessário para a Separação Geral pelo número de CRT's existente:

$$\text{Tempo}_{SG}/\text{CRT} = \frac{\text{Tempo}_{SG}}{\text{N}^{\circ} \text{ CRT}}$$

de onde resulta a determinação do tempo que cada Carteiro utiliza no processo de Separação Geral.

Os tempos necessários ao Arruamento obtêm-se com base nos tempos definidos no Anexo 1C, após a determinação do número de objectos a tratar por cada Carteiro:

$$\text{N}^{\circ} \text{ Objectos}/\text{CRT} = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ Obj. Total}}{\text{N}^{\circ} \text{ CRT do CDP}}$$

Finalmente, o tempo total necessário à realização das duas operações (soma dos tempos dispendidos na Separação Geral e Arruamento) é convertido em segundos e subtraído à hora pré-definida (9 h 30 m, também convertida em segundos) de início dos Giros.

Os valores obtidos, para cada CDP, são indicados no quadro seguinte:

	TEMPO DE OPERAÇÃO / CRT [Min]		TEMPO TOTAL / CRT [Min]	HORA LIMITE DE RECEPÇÃO DO CORREIO	
	SEP. GERAL	ARRUA MENTO		[H:Min]	[Seg]
1- ALBUFEIRA	61	138	199	6 : 11	22260
2 - ALCOUTIM	53	136	189	6 : 21	22860 *
3 - ALJEZUR	32	94	126	7 : 24	26640
4 - ALMANCIL	52	129	181	6 : 29	23340
5 - ARMAÇÃO PERA	66	137	203	6 : 07	22020
6 - CERCAL	42	109	151	6 : 59	25140 *
7 - FARO	50	123	173	6 : 37	23820
8 - LAGOA	40	109	149	7 : 01	25260

(CONTINUAÇÃO)

	TEMPO DE OPERAÇÃO / CRT [Min]		TEMPO TOTAL / CRT [Min]	HORA LIMITE DE RECEPÇÃO DO CORREIO	
	SEP. GERAL	ARRUA MENTO		[H:Min]	[Seg]
9 - LAGOS	48	121	169	6 : 41	24060
10 - LOULÉ	40	107	147	7 : 03	25380
11 - MONCHIQUE	48	120	168	6 : 42	24120
12 - ODEMIRA	42	99	141	7 : 09	25740 *
13 - OLHÃO	51	124	175	6 : 35	23700
14 - PORTIMÃO	57	127	184	6 : 26	23160
15 - QUARTEIRA	44	114	158	6 : 52	24720
16 - S. BRÁS	39	107	146	7 : 04	25440
17 - ST. CLARA	21	64	85	8 : 05	29100
18 - S.B.MESSINES	42	117	159	6 : 51	24660
19 - SILVES	36	95	131	7 : 19	26340
20 - TAVIRA	53	123	176	6 : 34	23640
21 - V.N.MILFONTES	29	89	118	7 : 32	27120 *
22 - V.R.S. ANTÓNIO	32	92	124	7 : 26	26760
23 - V.BISPO	67	132	199	6 : 11	22260 *

QUADRO 4.8: "Janelas de Tempo" nos CDP's

(*) Para os CDP's assinalados, as horas limite de recepção indicadas foram posteriormente alteradas, em virtude da impossibilidade física do seu cumprimento, ou seja, considerando:

- 1) A hora de partida das viaturas do Depósito (Guia): 5 h 00 m (Ver ponto 4.3.8).
- 2) A velocidade média dos veículos: 50 Km/h (Ver ponto 4.3.7).

verifica-se que o tempo de trajecto necessário para realizar os percursos directos entre o Depósito Central e esses CDP's é superior à diferença entre as respectivas

horas limite e a hora de início das rotas, o que inviabiliza qualquer possibilidade de cumprimento dessas "Janelas de Tempo".

Nesta situação optou-se pela abolição das Restrições Temporais nesses CDP's, definindo-se como nova hora limite de recepção do Correio as 24 h (teoricamente infinito).

Essas modificações são realizadas de forma automática pelo procedimento ALTDEADT, apresentado no Anexo 4.

4.3.6 TEMPOS DE PARAGEM

Em cada CDP, as viaturas efectuam paragens para proceder às cargas e descargas do Correio. Os tempos de paragem adoptados são idênticos aos estipulados actualmente pela Empresa (Ver Anexo 1D), após realizada a sua conversão para segundos, resultando:

	TEMPO DE PARAGEM [Seg]	
	DISPER-SÃO	CONCEN-TRAÇÃO
1 - ALBUFEIRA	900	600
2 - ALCOUTIM	600	600
3 - ALJEZUR	1200	300
4 - ALMANCIL	300	300
5 - ARMAÇÃO PERA	600	600
6 - CERCAL	300	300
7 - FARO	1200	600
8 - LAGOA	600	300
9 - LAGOS	1200	900
10 - LOULÉ	600	600
11 - MONCHIQUE	600	600
12 - ODEMIRA	480	300
13 - OLHÃO	600	600
14 - PORTIMÃO	1200	900
15 - QUARTEIRA	600	600

(CONTINUAÇÃO)

	TEMPO DE PARAGEM [Seg]	
	DISPER- SÃO	CONCEN- TRAÇÃO
16 - S. BRÁS	900	600
17 - ST. CLARA	180	180
18 - S.B.MESSINES	180	180
19 - SILVES	600	300
20 - TAVIRA	600	600
21 - V.N.MILFONTES	300	180
22 - V.R.S. ANTÓNIO	600	600
23 - V.BISPO	600	600

QUADRO 4.9: Tempos de Paragem em cada CDP

4.3.7 VELOCIDADE MÉDIA

O tempo utilizado na realização de um percurso é função da distância a percorrer (entre os CDP's) e da velocidade (média) da viatura, a qual foi fixada em 50 Km/h (ou seja, 72 seg/Km), com base na média ponderada das velocidades indicadas para as viaturas que actualmente executam as rotas de distribuição (Ver Anexo 1D).

4.3.8 HORA DE INÍCIO DAS ROTAS

Na resolução do Problema de Dispersão, considerou-se que todas as rotas partem do CTC da Guia, em simultâneo, às 5 h.

No entanto, após determinadas as soluções, a hora de partida de cada rota pode ser retardada de um período igual à "folga" mínima (diferença entre a hora de chegada ao CDP e a respectiva hora limite) de entre as calculadas para todos os CDP's que são servidos pelo mesmo veículo.

No Anexo 3A indicam-se os tipos de ficheiros de dados utilizados nos programas de resolução do Problema.

4.4 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

De entre as várias abordagens e métodos para a resolução do PORV, apresentados no Capítulo 3 do presente trabalho, seleccionaram-se dois métodos heurísticos de duas fases para aplicação ao Problema em causa, nomeadamente, o de Christofides et al (1979) e o de Fisher and Jaikumar (1981).

A adopção desses métodos baseou-se no facto de, por um lado, serem amplamente referidos na literatura como produzindo bons resultados na resolução do PORV e, por outro, existirem as respectivas implementações computacionais codificadas em PASCAL, realizadas pela Dr^a Gabriela Schütz que gentilmente as disponibilizou para aplicação neste trabalho.

É de salientar que a codificação dos métodos em linguagem de programação (procedimento necessário à sua execução sobre suportes informáticos) é normalmente uma tarefa "pesada" e morosa, pelo que se não tivessem sido utilizados os métodos base já codificados, certamente o tempo estipulado para a realização deste trabalho não seria suficiente para a sua total execução.

Observadas as causas que determinaram a selecção dos dois métodos supra citados, resta referir que estes foram posteriormente modificados no sentido de os adaptar à aplicação específica, em concreto ao Problema de Optimização das Rotas da Rede Secundária da Região Sul dos CTT. Essas alterações serão descritas quando forem apresentadas as implementações de cada um dos métodos.

A utilização de duas heurísticas independentes (Christofides et al e Fisher e Jaikumar) na resolução dos problemas permite encontrar um maior número de soluções distintas, compará-las e finalmente escolher a melhor, de entre todas as que cumprem os objectivos e as restrições impostas.

As heurísticas referidas permitem resolver o PORV sem Restrições Temporais, tendo sido aplicadas na resolução do Problema de Concentração e na primeira parte do Problema de Dispersão.

Este último, como anteriormente se referiu, envolve Restrições Temporais nos CDP's, pelo que às soluções obtidas pelas heurísticas iniciais (1^a parte) se aplicam, numa 2^a parte, as técnicas de pós-optimização com orientação temporal propostas em Nygard et al (1988), de modo a obter soluções finais de boa qualidade quanto ao cumprimento das "Janelas de Tempo" nos Clientes. Não existem disponíveis, para

este caso, as implementações computacionais desses procedimentos, pelo que aquelas foram desenvolvidas especificamente para a aplicação e efectuada a sua codificação em TURBOPASCAL.

4.4.1 METODOLOGIAS

Como atrás se referiu, as implementações disponíveis dos métodos (para o PORV) a utilizar estão codificadas em PASCAL. A primeira alteração introduzida foi a conversão desses programas para TURBOPASCAL, devido à maior potencialidade e actualidade desta linguagem de programação, em comparação com a primeira.

A descrição das metodologias utilizadas foi efectuada previamente nos Pontos 3.2.2.2, 3.2.2.3 e 3.3.5, realizando-se aqui a apresentação, para cada uma delas, do modo como se procedeu às respectivas implementações computacionais.

As heurísticas de duas fases de Christofides et al e de Fisher e Jaikumar diferem na resolução da 1ª fase que se refere à afectação dos clientes às rotas/veículos. A 2ª fase é idêntica para ambas as heurísticas e consiste na resolução de um Problema do Caixeiro Viajante (PCV) para cada conjunto de clientes afectos às rotas na 1ª fase, adoptando-se a mesma metodologia de resolução na 2ª fase dos dois métodos.

De modo a evitar a repetição da descrição da implementação dessa fase, optou-se por efectuar na apresentação seguinte, a descrição da 1ª fase das heurísticas em separado e a da 2ª fase em conjunto, após aquelas.

Por último, apresenta-se a implementação dos métodos de pós-optimização com orientação temporal que foram aplicados à variante do Problema anteriormente designada por Dispersão.

4.4.1.1 CHRISTOFIDES ET AL - FASE I (Schütz (1990))

- *Afectação sequencial*

Passo 1 - Escolher para "semente" o cliente k correspondente a :

$$\underset{i \in S}{\text{Máx}} \left[\prod_{j \in N-S} c_{ij} \right]$$

em que:

N é o conjunto dos clientes (CDP's)

S é o conjunto formado pelo Depósito (CTC da Guia), pelos clientes "semente" e pelos clientes já afectos no *Passo 2*.

c_{ij} é a distância euclidiana entre i e j .

Escolher um veículo disponível, seja V , e afectar a "semente" a esse veículo.

Passo 2 - Afectar ao veículo V , enquanto a sua capacidade o permitir, os clientes ainda "livres", por ordem crescente do "custo de inserção" relativo à "semente", definido por:

$$d_{ik} = c_{0i} + c_{ii_k} - c_{0i_k}$$

onde:

d_{ik} é o "custo de inserção" do cliente i em relação à "semente" k

$i_k \in \{\text{"sementes"}\}$

c_{ij} é a distância euclidiana entre i e j .

Se todos os clientes estiverem afectos a algum veículo, ou se todos os veículos foram já utilizados, ir para o *Passo 3*; senão voltar ao *Passo 1*.

Passo 3 - Memorizar esta solução e ir para o *Passo 4*.

- ***Afectação Paralela***

Passo 4 - Considerar as "sementes" afectas aos veículos no *Passo 1* e tornar todos os outros clientes "livres".

Passo 5 - Para todos os clientes "livres", calcular os "custos de inserção" (anteriormente definidos) relativos às "sementes" das rotas dos veículos, cuja capacidade não é excedida pela sua inclusão. Considerar os menores valores para cada cliente.

Passo 6 - Entre os clientes "livres", afectar aquele com menor "custo de inserção" ao veículo correspondente.

Passo 7 - Repetir o *Passo 5* para os clientes "livres" cuja melhor afectação deixou de ser admissível e continuar com o *Passo 6* até não ser possível efectuar mais afectações.

Passo 8 - Memorizar as afectações obtidas nos *Passos 3* e *7*, as quais são as duas soluções da 1ª fase.

Uma outra versão (também utilizada) deste método, referida em Schütz (1990), consiste na inclusão de trocas entre pares de clientes de conjuntos diferentes, sempre que:

- As capacidades dos veículos não sejam excedidas.
- Os dois clientes (um de cada conjunto) se encontrem a uma distância menor que:

$$\frac{\sum_{i=1}^N \text{distância do cliente } i \text{ à origem}}{2N}$$

- Os "custos de inserção" em relação às "sementes" sejam menores que os anteriores.

4.4.1.2 FISHER AND JAIKUMAR - FASE I (Schütz (1989))

Passo 1 - Selecção das "sementes"

É preconizado neste método que a escolha dos clientes "semente" se realize após a construção de cones de clientes agrupados em cones de veículos, da seguinte forma:

- 1) Transformar as coordenadas rectangulares (x,y) dos CDP's nas correspondentes coordenadas polares (r,θ) , considerando o Depósito Central como a origem $(0,0)$ dos dois sistemas de eixos. Para o cliente i vem:

$$\theta(i) = \arctg\left[\frac{y(i)}{x(i)}\right] \quad \text{e} \quad r(i) = \left[(x(i))^2 + (y(i))^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

2) Ordenar os clientes por ordem crescente de θ e construir os cones de clientes, sendo a fronteira entre dois cones a bissetriz do ângulo formado pelos dois clientes e o Depósito.

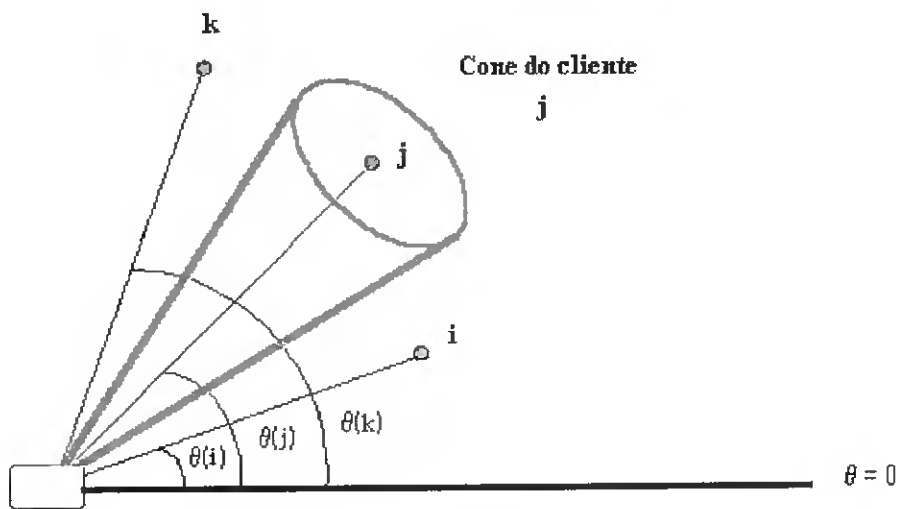


FIGURA 4.4

3) Construir os cones de veículos através do agrupamento de cones de clientes de forma a que, a procura acumulada dos clientes pertencentes a um cone de veículo seja igual ao quociente entre a procura total e o número de veículos existente, isto é, que haja uma distribuição homogênea de "carga" para cada cone.

4) Escolher em cada cone de veículo um cliente "semente", utilizando uma das seguintes alternativas:

S1 - Em cada cone de veículo, escolher para "semente" o cliente de *maior procura*.

S2 - Em cada cone de veículo, escolher para "semente" o cliente *mais próximo da bissetriz* desse cone.

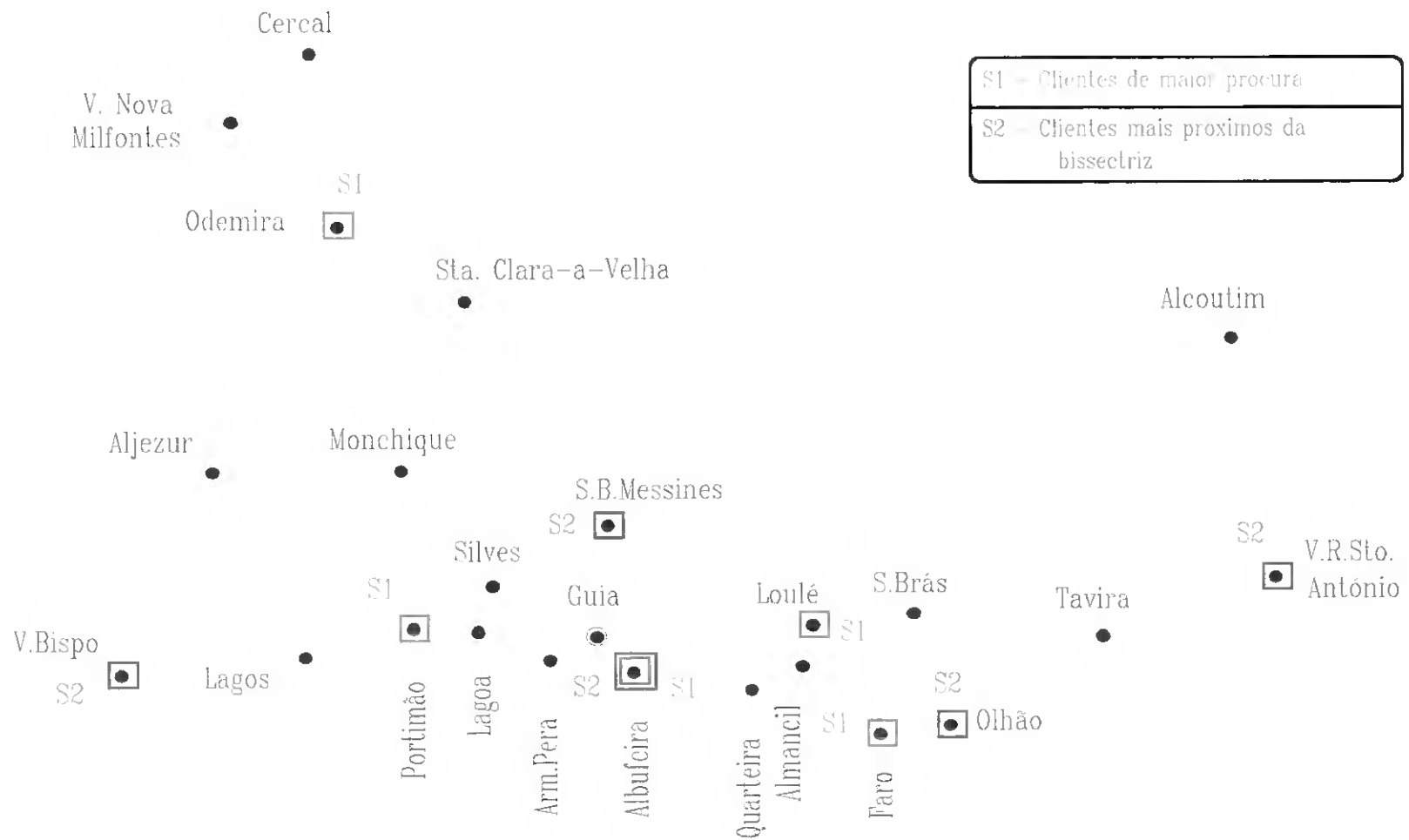


FIGURA 4.5: Exemplo dos dois conjuntos de clientes "semente" obtidos no processo de otimização das distâncias reais pelo método de Fisher e Jaikumar

Passo 2 - Calcular os "custos de inserção", d_{ik} , dos outros clientes na rota de cada um dos veículos, quando estes vão e voltam do Depósito à "semente", ou seja:

$$d_{ik} = c_{0i} + c_{ii_k} - c_{0i_k}$$

em que:

i_k é o cliente "semente"

i é o cliente a inserir

c_{ij} é a distância euclidiana entre i e j

Os "custos de inserção" (d_{ik}) calculados são os coeficientes da função objectivo (Ver expressão (3.31), ponto 3.2.2.3) do Problema de Afectação Generalizada (PAG), definida por:

$$\sum_{i,k} d_{ik} y_{ik}$$

Passo 3 - Resolução do seguinte PAG (conforme apresentado no ponto 3.2.2.3):

$$\text{Min } \sum_{i,k} d_{ik} y_{ik}$$

$$\text{s.a } \sum_k y_{ik} = \begin{cases} 1, & i = 2, \dots, N \\ M, & i = 1 \end{cases}$$

$$\sum_i q_i y_{ik} \leq Q_k \quad k = 1, \dots, M$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, N ; \quad k = 1, \dots, M$$

Na implementação computacional em análise (1ª fase da heurística de Fisher e Jaikumar) resolve-se o PAG, atrás formalizado, de forma exacta, através de um algoritmo de Pesquisa em Árvore (PA), usando uma estratégia de pesquisa em profundidade em que os minorantes são obtidos por relaxação Lagrangeana e os valores dos multiplicadores pelo método de optimização subgradiente.

O algoritmo e as técnicas referidas são apresentadas, de forma detalhada, em Schütz (1989).

De referir que a escolha dos clientes "semente" afectam, de forma decisiva, as soluções obtidas para o PAG e, conforme se expôs no *Passo 1*, a selecção desses clientes pode, em alternativa, ser baseada numa orientação para a procura dos clientes (S1) ou para as suas localizações (S2).

Assim, utilizando S1 obtemos uma solução para o PAG que é distinta da que resulta se o critério de selecção dos clientes "semente" for S2.

Pelo facto de se desconhecer a priori qual das alternativas (S1 ou S2) irá produzir melhores resultados para o PORV global, optou-se pela execução da 1ª fase da heurística duas vezes (uma para cada critério de selecção), o que conduz à obtenção de duas soluções diferentes para o PAG.

4.4.1.3 CHRISTOFIDES ET AL E FISHER AND JAIKUMAR - FASE II (Schütz (1989))

Nesta fase pretende-se resolver o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) para cada uma das viaturas existentes, de modo a obter a configuração das rotas dos veículos e o valor da distância total percorrida (para o PORV).

Para o efeito, utilizou-se o Método da Inserção Mais Afastada (MIMA), que se baseia no princípio de que se se construir um circuito entre os clientes mais afastados então a inclusão dos outros clientes não levará a um grande aumento no comprimento final do circuito.

A descrição do método é a seguinte, Schütz (1989):

Seja V_t o conjunto das localizações no circuito corrente.

Passo 1 - Começar com um circuito, formado pela localização i escolhida arbitrariamente, $V_t = \{i\}$.

Passo 2 - Encontrar a localização j tal que a distância entre i e j seja máxima e formar o circuito: $i-j-i$, $V_t = \{i, j\}$.

Passo 3 - Seleccionar a localização k , não pertencente ao subcircuito ($k \notin V_t$), mais distante de alguma localização do subcircuito.

Passo 4 - Encontrar o arco (i,j) no circuito corrente que minimize o "custo de inserção" da localização k , i.é,

$$(i,j) : c_{ik} + c_{kj} - c_{ij} \text{ é mínimo}$$

Inserir k entre i e j .

Passo 5 - Se não se tiver ainda um circuito Hamiltoniano, voltar ao *Passo 3*.

Este método é executado, para cada veículo, tantas vezes quanto o número de clientes afectos a esse veículo (determinado na resolução da 1ª fase), mais o cliente "semente" e o Depósito Central, o que possibilita iniciar cada execução do método (*Passo 1*) com uma localização diferente e reter (no final) a melhor rota obtida.

4.4.1.4 PROCEDIMENTOS DE PÓS-OPTIMIZAÇÃO COM ORIENTAÇÃO TEMPORAL

Para a resolução do Problema de Dispersão (apresentado no ponto 4.2) é necessário, como foi referido, considerar as "Janelas de Tempo" de cada CDP a servir. A aplicação dos métodos (espaciais) de Christofides et al e de Fisher e Jaikumar produzem soluções que não têm em conta o aspecto temporal do Problema.

Os procedimentos de pós-optimização referidos em Nygard et al (1988), cuja implementação seguidamente se descreve, partem das soluções obtidas por aqueles métodos e executam as alterações necessárias, de modo a que as Restrições Temporais sejam cumpridas.

4.4.1.4.1 PROCEDIMENTO "INTRAROTA"

Passo 1 - Para cada rota da solução inicial, verificar se são cumpridos os Tempos Limite de Recepção de cada CDP. Se sim, passa à rota seguinte. Caso contrário, passo seguinte.

Passo 2 - Efectuar o percurso em sentido inverso (a distância mantém-se) e verificar o cumprimento dos Tempos em todos os CDP's. Se falhar a Hora Limite nalgum, passo seguinte.

Passo 3 - Efectuar trocas entre os clientes pertencentes à mesma rota, do seguinte modo:

- Seleccionar o primeiro CDP, na sequência da rota, para o qual é violada a respectiva "Janela de Tempo".
- Encontrar, se existirem, todas as posições na rota em que esse CDP pode ser inserido, cumprindo as Restrições Temporais.
- Calcular os "custos de inserção" do CDP para cada posição admissível e inseri-lo na posição de menor custo.

Repetir este passo para todos os CDP's que não cumprem as Restrições Temporais e que se encontrem nas posições seguintes da mesma rota.

Passo 4 - Repetir o *Passo 3* para todas as rotas não admissíveis e memorizar as soluções encontradas.

4.4.1.4.2 PROCEDIMENTO "INTERROTA"

Passo 1 - Partindo das soluções finais obtidos no procedimento "Intrarota", verificar se são cumpridas as Restrições Temporais para todos os clientes afectos a todas as rotas. Se não são cumpridas nalgum cliente, passo seguinte.

Passo 2 - Listar os CDP's que não cumprem os Tempos Limite e ordená-los por ordem crescente das respectivas Horas Limite de aceitação (i.é, no sentido das "Janelas de Tempo" mais "apertadas" para as mais "largas"). Libertar esses clientes das rotas.

Passo 3 - Para o primeiro cliente (CDP) da lista ordenada obtida no passo 2 encontrar todas as posições (em todas as rotas) em que é possível introduzi-lo, de modo a que sejam cumpridas as Restrições de Capacidade dos veículos e Temporais de todos os CDP's das rotas.

Calcular os "custos de inserção" do CDP em cada uma dessas posições e inseri-lo naquela que minimiza esses custos.

Passo 4 - Repetir o passo 3 até esgotar todos os CDP's da lista e memorizar a solução final obtida para o PORVJT.

As implementações computacionais dos métodos de Christofides et al e de Fisher e Jaikumar encontram-se descritas e listadas em Schütz (1989) e Schütz (1990), enquanto a implementação dos Procedimentos Temporais (Intrarota e Interrota) de Pós-otimização são apresentados no Anexo 4.

4.5 RESULTADOS

Neste ponto apresentam-se os vários resultados obtidos para cada uma das execuções efectuadas dos dois métodos implementados.

Como atrás se referiu (Ver ponto 4.4.1), a execução de cada método conduz a duas soluções, nomeadamente, o de Christofides et al produz uma solução para a afectação *sequencial* e outra para a afectação em *paralelo* e no método de Fisher e Jaikumar obtêm-se duas soluções em função do tipo de selecção (*S1* ou *S2*) dos clientes "semente".

Para além disso, correram-se os programas com vista à obtenção de três objectivos distintos:

- Minimização das distâncias reais
- Minimização das distâncias euclidianas
- Minimização dos tempos

de modo a possibilitar a comparação entre um conjunto amplo de soluções obtidas.

4.5.1 PROBLEMA DE DISPERSÃO

Nas soluções obtidas nos processos de optimização dos *tempos* e das *distâncias euclidianas* referem-se - entre parêntesis, na coluna dos custos - as distâncias reais (em Km) de cada solução, o que permite a comparação entre as distâncias efectivamente percorridas por cada uma das várias soluções. Indicam-se ainda, a **cheio**, as melhores soluções encontradas.

O número das soluções seguidamente apresentadas foi estipulado considerando o seguinte critério:

Nº DA SOLUÇÃO:

DÍGITO	CARACTER
--------	----------

em que:

DÍGITO: 1 - Christofides et al - Afectação sequencial
 2 - Christofides et al - Afectação em paralelo
 3 - Fisher e Jaikumar - Selecção de "sementes" S1
 4 - Fisher e Jaikumar - Selecção de "sementes" S2

CARACTER: R - Optimização das distâncias Reais
 T - Optimização dos Tempos
 E - Optimização das distâncias Euclidianas

Este critério foi também aplicado na codificação das soluções modificadas e das soluções obtidas para as rotas de concentração, conforme se refere nas respectivas apresentações (a seguir).

Em cada execução foram tidas em conta as Restrições Temporais nos Clientes, obtendo-se as 12 soluções seguintes:

SOL Nº	RO TA Nº	PERCURSO	PESO [m ³]	CUS TO [Km]
1R	1	Guia-Arm.Pera-Portimão-Monchique-St.Clara-Cercal- V.N.Milfontes-Odemira	17.15	296
	2	Guia-Lagoa-Lagos-Aljezur-V.Bispo	7.81	176
	3	Guia-Albufeira-Quarteira-S.B.Messines-Silves	10.11	104
	4	Guia-Olhão-Tavira-V.R.S.António-Alcoutim	11.74	233
	5	Guia-Almancil-Faro-S.Brás-Loulé	18.14	97
TOTAL :			64.95	906
2R	1	Guia- Arm.Pera-Lagoa-Lagos-Aljezur-V.Bispo	9.75	179
	2	Guia-S.B.Messines-Silves-Monchique-St.Clara-Cercal- V.N.Milfontes-Odemira	7.24	305
	3	Guia-Portimão	10.48	48
	4	Guia-Quarteira-Almancil-Loulé-V.R.S.António-Alcoutim	12.23	239
	5	Guia-Albufeira-Faro-S.Brás	16.41	101
NAO SERVE: Olhão - Tavira				
TOTAL:			56.11	872
3R	1	Guia-S.Brás-Loulé-Quarteira	9.02	90
	2	Guia-S.B.Messines-Silves-Monchique-St.Clara-Cercal- V.N.Milfontes-Odemira	7.24	305
	3	Guia-Arm.Pera-Lagoa-Portimão-Lagos-V.Bispo	19.77	139
	4	Guia-Albufeira-Olhão-Faro	20.08	98
	5	Guia-Almancil-Tavira-V.R.S.António-Alcoutim	8.39	233
NAO SERVE: Aljezur				
TOTAL:			64.50	865

(CONTINUAÇÃO)

SOL Nº	RO TA Nº	PERCURSO	PESO [m ³]	CUS TO [Km]
4R	1	Guia-Loulé-S.Brás-V.R.S.António-Alcoutim	9.20	228
	2	Guia-Arm.Pera-Lagoa-Silves-S.B.Messines	6.66	58
	3	Guia-Portimão-Monchique-St.Clara-Cercal-V.N.Milfontes- Odemira	15.22	293
	4	Guia-Albufeira-Lagos-Aljezur-V.Bispo	10.48	188
	5	Guia-Quarteira-Almancil-Olhão-Faro	19.25	99
		NAO SERVE: Tavira		
		TOTAL:	60.81	866

QUADRO 4.10: Resultados obtidos na Optimização das DISTANCIAS REAIS -
Rotas de DISPERSÃO

SOL. Nº	RO TA Nº	PERCURSO	PESO [m ³]	CUS TO
1T	1	Guia-Albufeira-Almancil-S.B.Messines-Silves	8.76	112
	2	Guia-Loulé-Tavira-V.R.S.António -Alcoutim	12.30	228
	3	Guia-Lagoa-Portimão-Lagos-Aljezur-Odemira-Cercal- V.N.Milfontes-V.Bispo	22.00	325
	4	Guia-Faro-Quarteira	13.19	83
	5	Guia-Arm.Pera-Olhão-S.Brás	7.68	126
		NAO SERVE: Monchique-St.Clara		(874)
		TOTAL:	63.93	1071

(CONTINUAÇÃO)

SOL. Nº	RO TA Nº	PERCURSO	PESO [m ³]	CUS TO
2T	1	Guia- Arm.Pera-Lagoa-Monchique-Silves	6.59	103
	2	Guia-Albufeira-S.Brás-Tavira-Alcoutim	10.23	224
	3	Guia-Lagos-Portimão-Cercal-V.N.Milfontes-Odemira-V.Bispo	19.32	363
	4	Guia-S.B.Messines-Loulé-Faro	16.59	108
	5	Guia-Almancil-Olhão-Quarteira	8.78	99
			NAO SERVE: Aljezur - St.Clara - V.R.S.António	
TOTAL:			61.51	1077
3T	1	Guia-Quarteira-S.Brás-Loulé	9.02	90
	2	Guia-S.B.Messines-Silves-Monchique-St.Clara-Odemira-Cercal-V.N.Milfontes-V.Bispo	8.27	333
	3	Guia-Arm.Pera-Lagoa-Portimão-Lagos	18.74	93
	4	Guia-Albufeira-Olhão-Faro	20.08	98
	5	Guia-Almancil-Tavira-V.R.S.António-Alcoutim	8.39	233
			NAO SERVE: Aljezur	
TOTAL:			64.50	1038
4T	1	Guia-Loulé-Tavira-V.R.S.António-Alcoutim	12.30	228
	2	Guia-Arm.Pera-Lagoa-Silves-S.B.Messines	6.66	58
	3	Guia-Portimão-Monchique-St.Clara-Odemira-Cercal-V.N.Milfontes	15.22	293
	4	Guia-Albufeira-Lagos-Aljezur-V.Bispo	10.48	188
	5	Guia-Almancil-Faro-Olhão-S.Brás	17.58	110
			NAO SERVE: Quarteira	
TOTAL:			62.24	1076

QUADRO 4.11: Resultados obtidos na Optimização dos TEMPOS -Rotas de DISPERSÃO

NOTA: Os tempos de trajecto são uma função linear da distância real a percorrer na execução de cada ligação entre CDP's, dependendo da velocidade média das viaturas que foi fixada em 50 Km/h (ponto 4.3.7).

No entanto, considerou-se de interesse executar os algoritmos tendo como objectivo a minimização dos tempos, devido à existência de diferentes tempos de paragem em cada CDP - os quais foram previamente adicionados aos tempos de trajecto - do que resultou um conjunto de soluções distintas (Quadro anterior) das obtidas pelo processo de optimização das distâncias reais (Quadro 4.10).

SOL. Nº	RO TA Nº	PERCURSO	PESO [m ³]	CUS TO [Km]
1E	1	Guia-Albufeira-Almancil-Loulé-S.Brás	12.56	92
	2	Guia-Quarteira-Tavira-V.R.S.António-Alcoutim	9.75	238
	3	Guia-S.B.Messines-Monchique-Odemira-V.N.Milfontes-St.Clara	5.09	286
	4	Guia-Arm.Pera-Portimão-Lagos-Lagoa-Silves	20.39	108
	5	Guia-Olhão-Faro	15.18	94
			NAO SERVE: Aljezur - Cercal - V.Bispo	
TOTAL:			62.97	601
2E	1	Guia-S.B.Messines-Olhão-St.Clara	5.81	292
	2	Guia-Silves-Monchique-Odemira-V.N.Milfontes	5.64	276
	3	Guia-Loulé-S.Brás-Tavira-V.R.S.António-Alcoutim	13.34	228
	4	Guia- Arm.Pera-Portimão-Lagos-Lagoa	18.74	93
	5	Guia-Albufeira-Almancil-Faro-Quarteira	19.44	87
			NAO SERVE: Aljezur-Cercal-V.Bispo	
TOTAL:			62.97	675

(CONTINUAÇÃO)

SOL. Nº	RO TA Nº	PERCURSO	PESO [m ³]	CUS TO [Km]
3E	1	Guia-S.B.Messines-Quarteira-Almancil-S.Brás-Loulé	11.23	123
	2	Guia-V.Bispo-Silves-St.Clara	2.92	275
	3	Guia-Arm.Pera-Lagoa-Portimão-Lagos-Aljezur	19.19	153
	4	Guia-Albufeira-Faro	15.37	82
	5	Guia-Olhão-Tavira-V.R.S.António-Alcoutim	11.74	233
		NAO SERVE: Cercal-Monchique-Odemira-V.N.Milfontes		(866)
		TOTAL:	60.45	652
4E	1	Guia-Loulé-Tavira-V.R.S.António-Alcoutim	12.30	228
	2	Guia-S.B.Messines-Monchique-Silves-Lagoa	5.52	113
	3	Guia-Portimão-Lagos-Aljezur-St.Clara	15.28	232
	4	Guia-Albufeira-Arm.Pera-S.Brás	7.87	108
	5	Guia-Quarteira-Almancil-Olhão-Faro	19.25	99
		NAO SERVE: Cercal-V.N.Milfontes-Odemira-V.Bispo		(780)
		TOTAL:	60.22	588

QUADRO 4.12: Resultados obtidos na Optimização das DISTÂNCIAS EUCLIDIANAS - Rotas de DISPERSÃO

NOTA: Apresentam-se, no Anexo 3, os tipos de Ficheiros de Entrada (dados) e Saída (soluções) para cada um dos programas utilizados.

Da análise dos resultados obtidos constata-se que os dois de menor custo (4E : 780 Km ; 1E: 818 Km) foram obtidos quando se realizou a optimização das rotas com base nas distâncias euclidianas, no entanto, devido às Restrições Temporais do Problema, as rotas da solução 4E não servem os CDP's de Cercal, Vila Nova de

Milfontes, Odemira e Vila do Bispo e as da 1E não servem Aljezur, Cercal e Vila do Bispo, pelo que não são admissíveis.

De referir que os CDP's não servidos se encontram localizados nos extremos da Região e, conseqüentemente, as suas distâncias ao Depósito Central (Guia) são bastante elevadas. Por esse facto, as rotas obtidas nessas soluções têm um custo mais baixo (só contabilizam as distâncias aos CDP's servidos) obtido à custa da exclusão de alguns clientes das rotas.

Verifica-se ainda que todas as soluções obtidas na optimização das distâncias euclidianas não servem pelo menos três CDP's, pelo que se podem considerar de baixa qualidade, do ponto de vista do cumprimento das "Janelas de Tempo" nos Clientes, não sendo, por isso, realizada a sua análise comparativa com as restantes oito soluções obtidas.

O processo de optimização das distâncias reais produziu a solução designada por 1R, que é a única admissível (das doze), ou seja, que cumpre integralmente as Restrições de Capacidade e Temporais, sendo portanto a solução final para o Problema proposto.

No entanto, em virtude do custo dessa solução (906 Km) ser um dos piores de entre todos os obtidos (ordenando por ordem crescente os custos das 12 soluções, ocupa a 11ª posição) entendeu-se interessante analisar algumas das soluções não admissíveis (referidas nos Quadros 4.10 e 4.11), com base nos seguintes pressupostos:

1) A qualidade das soluções não admissíveis obtidas nos processos de optimização das distâncias reais e dos tempos é "aceitável", porquanto as percentagens de tráfego (em volume, definidas por $[\text{Peso Total da Solução/Procura Total}] \times 100\%$) que cumprem o padrão de qualidade variam entre 86.4% (Sol: 2R) e 99% (Sol: 3R e 3T) do valor global da Região.

2) Uma solução não admissível de baixo custo pode justificar o estabelecimento, para as rotas que não cumprem o padrão, de horas de partida anteriores às 5 h 00 m (pré-definida), tornando a solução admissível.

A capacidade de tratamento de Correio no CTC da Guia e a dimensão da antecipação de tempo necessária para que a solução possa tornar-se admissível, limitam a aplicabilidade da modificação referida.

3) Considera-se que uma solução não admissível (relativamente às restrições temporais) pode ser, em termos práticos, uma boa solução para o Problema, se minimiza os custos totais e se os clientes em que não são cumpridas as "Janelas de Tempo" forem:

- a) Ou em pequeno número.
- b) Ou de importância reduzida, ou seja, com pequeno tráfego quando comparados com os restantes.
- c) Ou se situem nos extremos da Região e portanto bastante distantes do Depósito Central.

No sentido de possibilitar à Empresa a decisão de escolha entre a solução admissível 1R e outra qualquer solução que, embora não cumprindo a Restrição Temporal no(s) cliente(s) não servido(s), conduza a um custo inferior, apresentam-se seguidamente as soluções modificadas de modo a que o(s) cliente(s) não servido(s) seja(m) introduzido(s) nas rotas pré-definidas, tendo em conta que:

- A introdução do cliente é feita ou no final da rota em que for inserido, i.é., entre o último CDP da rota e o Depósito Central, por forma a evitar a violação das "Janelas de Tempo" de outros CDP's, ou noutra posição, desde que não degrade a qualidade (temporal) da solução de partida.
- A sua inclusão é feita na rota e posição que minimiza o incremento do custo, após análise dos "custos de inserção" para todas as alternativas possíveis.
- A solução modificada tenha um custo inferior à solução admissível (1R).

Nº SOL. INIC.	CDP A INCLUIR	Nº RO-TA	MODIFICAÇÃO	CUSTO TOTAL [Km]	Nº SOL. MODIF
2R	Olhão Tavira	4	...Alcoutim-Tavira-Olhão-Guia	900	2RM1
3R	Aljezur	2	...Odemira-Aljezur-Guia	867	3RM1
		3	...Lagos-Aljezur-V.Bispo...	905	3RM2
			...V.Bispo-Aljezur-Guia	905	3RM3
4R	Tavira	1	...Alcoutim-Tavira-Guia	889	4RM1
3T	Aljezur	2	...V.N.Milfontes-Aljezur-V.Bispo...	847	3TM1
			...V.Bispo-Aljezur-Guia	887	3TM2
4T	Quarteira	1	...Alcoutim-Quarteira-Guia	893	4TM1
		5	...S.Brás-Quarteira-Guia	885	4TM2

QUADRO 4.13: Soluções Modificadas - Rotas de DISPERSÃO

NOTA: A utilização de um critério análogo ao referido no início deste ponto permitiu definir o número das soluções modificadas como segue:

Nº DA SOLUÇÃO:

DÍGITO 1	CARACTER	M	DÍGITO 2
----------	----------	---	----------

em que:

DÍGITO 1: Idêntico ao definido no início deste ponto

CARACTER: Idem

M: Solução modificada

DÍGITO 2: Número de ordem (sequencial) das soluções modificadas que partem da mesma solução inicial

De referir ainda que os dois primeiros códigos (Dígito 1, Caracter) identificam a solução de partida que origina a solução modificada obtida.

As soluções modificadas evidenciam uma relação inversa entre o custo total e a qualidade das soluções, tendo como referencial a solução admissível 1R, ou seja,

para reduzir os custos da solução admissível há que pagar um preço em termos de qualidade.

A solução admissível 1R e as soluções modificadas de custo inferior à solução CTT existente são apresentadas, graficamente, no final deste Capítulo.

Descritas as alternativas possíveis, cabe aos Órgãos de Gestão da Empresa optar e decidir sobre qual a solução a adoptar, tendo em conta o balanço Custo/Qualidade acima referido, bem como a análise comparativa efectuada no ponto 4.5.3.

4.5.2 PROBLEMA DE CONCENTRAÇÃO

Os resultados para este Problema foram obtidos através da utilização dos programas sem os Procedimentos Temporais, conforme se referiu no ponto 4.4. Da sua aplicação resultou:

SOL. Nº	RO TA Nº	PERCURSO	PESO [m ³]	CUS TO [Km]
1RC	1	Guia-Arm.Pera-Aljezur-V.N.Milfontes-Cercal-St.Clara-Monchique-Portimão	14.66	298
	2	Guia-V.Bispo-S.B.Messines-Alcoutim-S.Brás-Olhão-Almancil-Albufeira	14.04	373
	3	Guia-Quarteira-Silves-Odemira-Lagos-Lagoa	13.63	282
	4	Guia-V.R.S.António-Tavira-Loulé	12.14	172
	5	Guia-Faro	10.47	78
TOTAL:			64.95	1203

(CONTINUAÇÃO)

SOL. Nº	RO TA Nº	PERCURSO	PESO [m ³]	CUS TO [Km]
2RC	1	Guia-S.B.Messines-Cercal-V.N.Milfontes-V.Bispo-Lagos-Lagoa-Arm.Pera	10.91	336
	2	Guia-Silves-Monchique-St.Clara-Alcoutim-Tavira-Olhão-S.Brás	12.72	388
	3	Guia-Aljezur-Odemira-Portimão	13.88	230
	4	Guia-Quarteira-Almancil-V.R.S.António-Loulé	12.08	182
	5	Guia-Albufeira-Faro	15.37	82
TOTAL :			64.95	1218
3RC	1	Guia-Alcoutim-S.Brás-Loulé-Almancil-Quarteira	10.53	221
	2	Guia-S.B.Messines-Silves-Monchique-St.Clara-Odemira-V.N.Milfontes-Cercal-Aljezur-V.Bispo-Lagos-Lagoa	15.05	333
	3	Guia-Arm.Pera-Portimão	12.41	51
	4	Guia-Albufeira	4.89	12
	5	Guia-Tavira-V.R.S.António-Olhão-Faro	22.06	177
TOTAL :			64.95	794
4RC	1	Guia-Alcoutim-V.R.S.António-Tavira-S.Brás-Loulé	13.34	228
	2	Guia-S.B.Messines-Silves-Lagoa	4.73	55
	3	Guia-Arm.Pera-Lagos-V.Bispo-Aljezur-Cercal-V.N.Milfontes-Odemira-St.Clara-Monchique-Portimão	22.73	324
	4	Guia-Albufeira	4.89	12
	5	Guia-Quarteira-Almancil-Faro-Olhão	19.25	99
TOTAL :			64.95	718

QUADRO 4.14: Resultados obtidos na Optimização das DISTÂNCIAS REAIS - Rotas de CONCENTRAÇÃO

SOL. N°	RO TA N°	PERCURSO	PESO [m ³]	CUS TO
ITC	1	Guia-Almancil-Alcouthim-S.B.Messines-Silves-Monchique-St. Clara-Cercal-V.N.Milfontes-Odemira-Aljezur-V.Bispo-Lagoa-Arm.Pera	14.40	594
	2	Guia-V.R.S.António-Tavira-S.Brás-Loulé	13.18	218
	3	Guia-Lagos-Portimão	14.58	140
	4	Guia-Quarteira-Faro	13.19	125
	5	Guia-Olhão-Albufeira	9.60	127
	TOTAL :			64.95
2TC	1	Guia-S.B.Messines-Silves-Monchique-St. Clara-Cercal-V.N.Milfontes-Odemira-Aljezur-V.Bispo-Lagoa-Arm.Pera	12.89	408
	2	Guia-Alcouthim-V.R.S.António-Tavira-S.Brás-Loulé	13.34	282
	3	Guia-Lagos-Portimão	14.58	140
	4	Guia-Faro	10.47	95
	5	Guia-Almancil-Olhão-Quarteira-Albufeira	13.67	137
	TOTAL :			64.95
3TC	1	Guia-Alcouthim-S.Brás-Loulé-Almancil-Quarteira	10.53	267
	2	Guia-S.B.Messines-Silves-Monchique-St. Clara-V.N.Milfontes-Cercal-Odemira-Aljezur-V.Bispo-Lagos-Lagoa-Arm.Pera	16.99	436
	3	Guia-Portimão	10.48	65
	4	Guia-Albufeira	4.89	25
	5	Guia-Tavira-V.R.S.António-Olhão-Faro	22.06	235
	TOTAL :			64.95

(CONTINUAÇÃO)

SOL. Nº	RO TA Nº	PERCURSO	PESO [m ³]	CUS TO
4TC	1	Guia-Alcoutim-V.R.S.António-Tavira-S.Brás-Loulé	13.34	282
	2	Guia-S.B.Messines-Silves-Lagoa	4.73	77
	3	Guia-Arm.Pera-Lagos-V.Bispo-Aljezur-Odemira-Cercal-V.N.Milfontes-St.Clara-Monchique-Portimão	22.73	418
	4	Guia-Albufeira	4.89	25
	5	Guia-Quarteira-Olhão-Faro-Almancil	19.25	132
				(718)
TOTAL :			64.95	934

QUADRO 4.15: Resultados obtidos na Optimização dos TEMPOS - Rotas de CONCENTRAÇÃO

SOL. Nº	RO TA Nº	PERCURSO	PESO [m ³]	CUS TO [Km]
1EC	1	Guia-S.B.Messines-Monchique-V.N.Milfontes-St.Clara-Alcoutim-S.Brás-Loulé-Almancil-Albufeira	14.86	303
	2	Guia-Quarteira-Cercal-Aljezur-V.Bispo-Lagos-Lagoa-Silves-Arm.Pera	14.61	260
	3	Guia-Odemira-V.R.S.António-Tavira-Olhão	14.53	259
	4	Guia-Portimão	10.48	42
	5	Guia-Faro	10.47	70
				(1400)
TOTAL :			64.95	934

(CONTINUAÇÃO)

SOL. Nº	RO TA Nº	PERCURSO	PESO [m ³]	CUS TO [Km]
2EC	1	Guia-S.B.Messines-St. Clara-Alcoutim-Olhão-Albufeira	10.86	236
	2	Guia-Silves-Monchique-Odemira-Cercal-V.N.Milfontes-Aljezur-V.Bispo-Lagos-Arm.Pera	13.66	226
	3	Guia-Almancil-Tavira-V.R.S.António-S.Brás-Loulé	14.54	157
	4	Guia-Lagoa-Portimão	12.71	42
	5	Guia-Quarteira-Faro	13.19	70
TOTAL :			64.95	731 (1020)
3EC	1	Guia-Quarteira-Almancil-S.Brás-Loulé	10.38	76
	2	Guia-Silves-V.Bispo-Aljezur-V.N.Milfontes-Cercal-Odemira-St. Clara-Monchique-S.B.Messines	8.73	243
	3	Guia-Arm.Pera-Lagos-Portimão-Lagoa	18.74	68
	4	Guia-Albufeira	4.89	12
	5	Guia-Alcoutim-V.R.S.António-Tavira-Olhão-Faro	22.21	197
TOTAL :			64.95	596 (779)
4EC	1	Guia-Alcoutim-V.R.S.António-Tavira-S.Brás-Loulé	13.34	191
	2	Guia-S.B.Messines-Lagoa	3.08	48
	3	Guia-Silves-Monchique-St. Clara-Odemira-Cercal-V.N.Milfontes-Aljezur-V. Bispo-Lagos-Portimão	22.45	234
	4	Guia-Arm.Pera-Albufeira	6.83	22
	5	Guia-Almancil-Olhão-Faro-Quarteira	19.25	85
TOTAL :			64.95	580 (731)

QUADRO 4.16: Resultados obtidos na Optimização das DISTÂNCIAS EUCLIDIANAS - Rotas de CONCENTRAÇÃO

NOTA: A codificação das soluções obtidas para as Rotas de Concentração é idêntica à definida no início da apresentação das soluções para o problema de Dispersão (ver ponto 4.5.1), acrescentando-se o carácter C que designa Concentração.

As restantes considerações aí efectuadas são válidas também para este caso.

Para cada uma das rotas obtidas, a escolha do sentido a adoptar para a sua execução baseou-se no seguinte:

1) A distância a percorrer por cada rota é independente do sentido em que é realizada, em virtude de se iniciarem e finalizarem no Depósito Central (circuito fechado) e da simetria das distâncias kilométricas entre quaisquer duas localizações consideradas.

2) Para cada CDP (servido por determinada rota) a respectiva hora de corte de recepção do Correio (ao público) depende do horário de chegada do veículo da Rede de Concentração a esse CDP.

Nesse sentido, um CDP que seja servido no início da rota irá ter uma hora de corte muito mais cedo daquela que teria se fosse servido no fim.

Tendo como objectivo, no processo de Concentração, a recolha da maior quantidade de Correio o mais tarde possível, os sentidos das rotas obtidas pelos algoritmos de minimização das distâncias (apresentados nos Quadros 4.14 a 4.16) foram definidos considerando, para cada rota, que a metade de maior "peso" deve ser servida no final da respectiva rota, ou seja se, por exemplo, uma rota possui um "peso" de 20 m^3 e a sua divisão (em duas partes com igual número de CDP's) conduzir a dois subconjuntos de CDP's com "pesos" de 14 m^3 e de 6 m^3 respectivamente, então o sentido da sua realização será o de servir em primeiro lugar o subconjunto de menor "peso" (6 m^3) e por último o de maior (14 m^3).

Este critério permite, de algum modo, dar relevância aos CDP's mais "importantes" (de maior tráfego), servi-los na sequência final das rotas e, conseqüentemente, melhorar as suas respectivas horas de corte, o que produz um efeito de melhoria do padrão de qualidade global da Região, mantendo o custo total das soluções.

Por último e a título de exemplo, referem-se para as três soluções de menor custo (de entre as apresentadas nos Quadros 4.14 a 4.16) as horas de chegada a cada CDP e de

início de cada rota, tendo em conta que foi fixada como hora limite de chegada dessas rotas à Guia as 20 h 15 m (uma hora antes do início da 1ª carreira da rede primária a sair da Guia - Ver Anexo 1D), de modo a garantir a ligação destas com a rede primária, conforme se referiu no ponto 4.2.

	HORÁRIO DE CHEGADA [H:M]		
	SOLUÇÃO 4RC CUSTO: 718	SOLUÇÃO 4TC CUSTO: 718	SOLUÇÃO 4EC CUSTO: 731
1- ALBUFEIRA	19 : 58	19 : 58	19 : 58
2 - ALCOUTIM	16 : 49	16 : 49	16 : 49
3 - ALJEZUR	15 : 05	15 : 05	17 : 29
4 - ALMANCIL	18 : 30	19 : 38	18 : 14
5 - ARMAÇÃO PERA	12 : 35	12 : 35	19 : 33
6 - CERCAL	16 : 33	16 : 38	15 : 45
7 - FARO	18 : 49	19 : 13	19 : 02
8 - LAGOA	19 : 52	19 : 52	19 : 52
9 - LAGOS	13 : 33	13 : 33	18 : 51
10 - LOULÉ	19 : 31	19 : 31	19 : 31
11 - MONCHIQUE	18 : 51	18 : 51	13 : 38
12 - ODEMIRA	17 : 26	16 : 00	15 : 07
13 - OLHÃO	19 : 09	18 : 54	18 : 43
14 - PORTIMÃO	19 : 31	19 : 31	19 : 31
15 - QUARTEIRA	18 : 11	18 : 11	19 : 35
16 - S. BRÁS	19 : 06	19 : 06	19 : 06
17 - ST. CLARA	18 : 09	18 : 09	14 : 27
18 - S.B.MESSINES	19 : 14	19 : 14	19 : 19
19 - SILVES	19 : 37	19 : 37	12 : 58
20 - TAVIRA	18 : 29	18 : 29	18 : 29
21 - V.N.MILFONTES	16 : 56	17 : 01	16 : 08
22 - V.R.S. ANTÓNIO	17 : 52	17 : 52	17 : 52
23 - V.BISPO	14 : 15	14 : 15	18 : 13

QUADRO 4.17: Horas de chegada a cada CDP para as três soluções de menor custo obtidas na resolução do Problema de Concentração

NOTA: No Quadro anterior, assinalaram-se a cheio os melhores tempos de chegada a cada CDP, de entre os obtidos para as três soluções apresentadas.

Apresenta-se, no quadro seguinte, uma síntese das características das três soluções referidas.

	CUSTO	MELHOR HORA DE CORTE	
		Nº CDP'S	% VOL. TRÁFEGO
SOLUÇÃO 4RC	MELHOR	13	64
SOLUÇÃO 4TC	MELHOR	15	71
SOLUÇÃO 4EC	PIOR	14	65

QUADRO 4.18: Balanço Custo/Qualidade

e as respectivas horas de início das rotas, a partir da Guia, são:

N ^a SOLUÇÃO	Nº ROTA	HORA DE PARTIDA DA GUIA [H:M]
4RC e 4TC	1	14 : 51
	2	18 : 56
	3	12 : 25
	4	19 : 51
	5	17 : 41
4EC	1	14 : 51
	2	19 : 01
	3	12 : 31
	4	19 : 24
	5	17 : 41

QUADRO 4.19: Horas de início de cada rota para as três soluções de menor custo obtidas na resolução do Problema de Concentração

As rotas das soluções obtidas para o Problema de Concentração, cujo custo é inferior ao da solução CTT em vigor, são apresentadas graficamente no final do presente Capítulo.

4.5.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS SOLUÇÕES OBTIDAS E A REDE CTT EXISTENTE

As redes de Dispersão e Concentração actualmente realizadas pela Empresa CTT são indicadas no Anexo 1D.

Da sua análise constata-se que os CDP's de Monchique e Alcoutim são servidos através de um transporte alugado (segundo informação recolhida junto da DRCA) e não pelas viaturas que compõem a frota de distribuição da empresa.

Para se efectuar a comparação dessas redes com as soluções obtidas (pontos 4.5.1 e 4.5.2) é necessário compatibilizá-las com estas, considerando as seguintes alternativas:

- 1) A frota existente ser de sete veículos (5 para as rotas "normais" mais 2 para servir os CDP's de Monchique e Alcoutim, em paralelo) em vez de cinco.
- 2) Inserir os CDP's não servidos pela rede na posição seguinte ao CDP de onde parte/chega o tráfego para esses destinos, na rede actual.

A primeira alternativa exige o investimento na aquisição de duas viaturas suplementares para servir CDP's de pequena procura (a soma das duas não atinge 1m³), o que não é economicamente viável. Adoptou-se, portanto, a segunda alternativa, inserindo os CDP's de:

- *Monchique* entre Portimão e Lagos
- *Alcoutim* entre V.R.Sto. António e o retorno ao Depósito.

De referir ainda que, na informação apresentada no Anexo 1D, o CDP de Colos também é servido através de transporte alugado (extra viaturas da frota). No entanto, quando se deu início a este trabalho já a Empresa tinha procedido à alteração dessa situação, retirando o "estatuto" de CDP a Colos e integrando-o na Rede Terciária de Odemira, facto pelo qual a localização Colos não foi considerada na elaboração das rotas da Rede Secundária da Região Sul.

Face às alterações atrás enunciadas, a rede de distribuição dos CTT adoptada para efeitos comparativos é a seguinte:

ROTA Nº	PERCURSO	PESO [m ³]	CUSTO [Km]
1	Guia-Albufeira-Arm.Pera- Lagoa-Silves	10.70	58
2	Guia-Portimão-Monchique-Lagos-V.Bispo-Aljezur	16.85	201
3	Guia-Loulé-Quarteira-Almancil-S.Brás	10.38	107
4	Guia-S.B.Messines-St.Clara-Odemira-V.N.Milfontes-Cercal	4.81	305
5	Guia-Faro-Olhão-Tavira-V.R.S.António-Alcoutim	22.21	233
TOTAL		64.95	904

QUADRO 4.20: Percursos da Rede CTT em vigor - Dispersão

ROTA Nº	PERCURSO	PESO [m ³]	CUSTO [Km]
1	Guia-Silves-Lagoa-Arm.Pera-Albufeira	10.70	58
2	Guia-Aljezur-V.Bispo-Lagos-Monchique-Portimão	16.85	201
3	Guia-S.Brás-Loulé-Almancil-Quarteira	10.38	93
4	Guia-Cercal-V.N.Milfontes-Odemira-St.Clara-S.B.Messines	4.81	305
5	Guia-Alcoutim-V.R.S.António-Tavira-Olhão-Faro	22.21	233
TOTAL		64.95	890

QUADRO 4.21: Percursos da Rede CTT em vigor - Concentração

Para conhecer a "qualidade temporal" destas soluções, i. é., o cumprimento (ou não) das "Janelas de Tempo" nos CDP's (Rotas de Dispersão), adoptaram-se as mesmas premissas que foram utilizadas na obtenção das soluções pelos algoritmos, nomeadamente:

- 1) *Custo*: Definido em função das distâncias reais a percorrer entre os CDP's.
- 2) *Velocidade dos veículos*: Valor médio de 50 Km/h.

3) *Hora de partida das rotas*: Início na Guia às 5 h 00 m, para todas as rotas de Dispersão.

4) *Tempos de paragem e limite de chegada aos CDP's*: Idênticos aos utilizados na obtenção dos resultados.

de onde resultam as seguintes horas de chegada a cada CDP:

CDP	HORA DE CHEGADA [H:M]	HORA LIMITE [H:M]	ATRASO EM RELAÇÃO AO PADRÃO [H:M]
1 - ALBUFEIRA	5 : 07	6 : 11	
2 - ALCOUTIM	8 : 33	24 : 00 (*)	
3 - ALJEZUR	9 : 02	7 : 24	1 : 38
4 - ALMANCIL	6 : 15	6 : 29	
5 - ARMAÇÃO PERA	5 : 36	6 : 07	
6 - CERCAL	8 : 35	24 : 00 (*)	
7 - FARO	5 : 47	6 : 37	
8 - LAGOA	5 : 58	7 : 01	
9 - LAGOS	7 : 24	6 : 41	0 : 43
10 - LOULÉ	5 : 34	7 : 03	
11 - MONCHIQUE	6 : 19	6 : 42	
12 - ODEMIRA	7 : 36	24 : 00 (*)	
13 - OLHÃO	6 : 17	6 : 35	
14 - PORTIMÃO	5 : 29	6 : 26	
15 - QUARTEIRA	5 : 57	6 : 52	
16 - S. BRÁS	6 : 44	7 : 04	
17 - ST. CLARA	6 : 56	8 : 05	
18 - S.B.MESSINES	5 : 18	6 : 51	
19 - SILVES	6 : 18	7 : 19	

(CONTINUAÇÃO)

CDP	HORA DE CHEGADA [H:M]	HORA LIMITE [H:M]	ATRASO EM RELAÇÃO AO PADRÃO [H:M]
20 - TAVIRA	6 : 52	6 : 34	0 : 18
21 - V.N.MILFONTES	8 : 12	24 : 00 (*)	
22 - V.R.S. ANTÓNIO	7 : 30	7 : 26	0 : 04
23 - V.BISPO	8 : 12	24 : 00 (*)	

QUADRO 4.22: Tempos de chegada aos CDP's da Rede CTT existente

(*) - Teoricamente infinito, conforme indicado no ponto 4.3.5.

Da observação do quadro anterior, verifica-se que as horas limite de chegada ("Janelas de Tempo") não são cumpridas nos CDP's de Aljezur, Lagos, Tavira e Vila Real de Santo António (indicadas a cheio).

Nos quadros seguintes sintetizam-se os custos e características temporais das redes de Dispersão e Concentração em vigor na Empresa e das soluções obtidas na resolução desses Problemas pelos algoritmos utilizados.

DISPERSÃO				
SOLUÇÃO	CUSTO [Km]	VARIAÇÃO CUSTO [%]	ATRASOS	
			Nº CDP's	% VOLUME
CTT	904	0	4	17.6
1R	906	0.2	0	0
2RM1	900	- 0.4	2	13.6
3RM1	867	- 4.1	1	0.7
4RM1	889	- 1.7	1	6.4
3TM1	847	- 6.3	1	0.7
4TM2	885	- 2.1	1	4.2

QUADRO 4.23

em que:

Número de CDP's com atraso e o Custo foram retirados dos Quadros de soluções.

A *Varição de Custo* foi obtida pela expressão:

$$\left[\frac{\text{Custo da solução obtida}}{\text{Custo da solução CTT}} - 1 \right] \times 100\%$$

Os valores negativos (-) indicam redução nos Custos.

A *Porcentagem de Volume* foi calculada através da seguinte expressão:

$$\left[\frac{\text{Soma dos tráfegos que não cumprem a Rest. Temporal [m}^3\text{]}}{\text{Tráfego Total [m}^3\text{] (= 64.95 m}^3\text{)}} \right] \times 100\%$$

Da observação do Quadro 4.23 (Soluções finais para as Rotas de Dispersão) constata-se que:

- Todas as soluções obtidas pelos métodos utilizados possuem uma Qualidade Temporal superior à da solução CTT existente, quer em número de CDP's para os quais não são cumpridas as "Janelas de Tempo", quer nas correspondentes percentagens de volume de tráfego que são entregues com atraso em relação ao padrão estabelecido.
- Com excepção da solução admissível 1R (com um custo global superior em 0.2%), todas as restantes soluções têm um Custo Total inferior à solução CTT.

De salientar ainda que para a solução 1R se obtém uma melhoria na Qualidade em 17.6% do tráfego (cumprindo-se as Restrições Temporais em todos os CDP's) com uma "penalização" pouco significativa nos Custos (0.2%).

As restantes soluções (modificadas) melhoram, simultaneamente, os Custos (de 0.4% a 6.3%) e a Qualidade (de 4% a 16.9%), em comparação com a solução actualmente utilizada pela Empresa.

CONCENTRAÇÃO		
SOLUÇÃO	CUSTO [Km]	VARIAÇÃO DE CUSTO* [%]
CTT	890	0
3RC	794	- 10.8
4RC	718	- 19.3
2TC	831	- 6.6
3TC	794	- 10.8
4TC	718	- 19.3
3EC	779	- 12.5
4EC	731	- 17.9

QUADRO 4.24

(*) A Variação de Custo é calculada de modo idêntico ao referido para o caso das Rotas de Dispersão (Ver Quadro 4.22).

Das doze soluções obtidas para as Rotas de Concentração (Quadros 4.14 a 4.16) indicam-se, no Quadro anterior, as sete que melhoram o Custo em relação à solução CTT, verificando-se ser possível obter, nesses casos, reduções entre 6.6% e 19.3% do Custo inicial, conforme a solução adoptada.

Para uma melhor visualização do conjunto total de soluções encontradas para os dois tipos de problema propostos - Dispersão e Concentração - e das rotas actualmente utilizadas pela Empresa, apresentam-se esses resultados de forma gráfica, nas páginas seguintes.

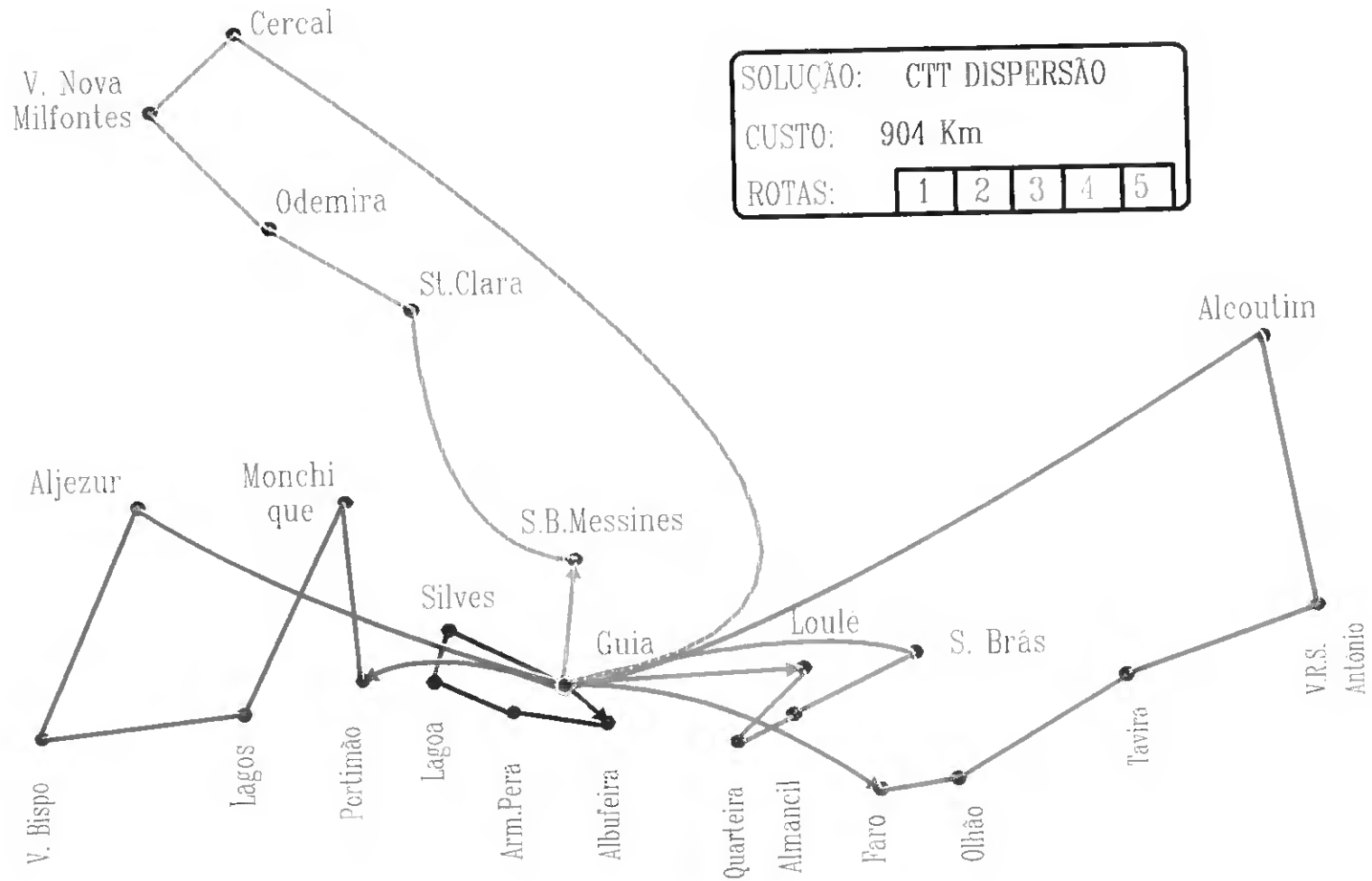


FIGURA 4.6

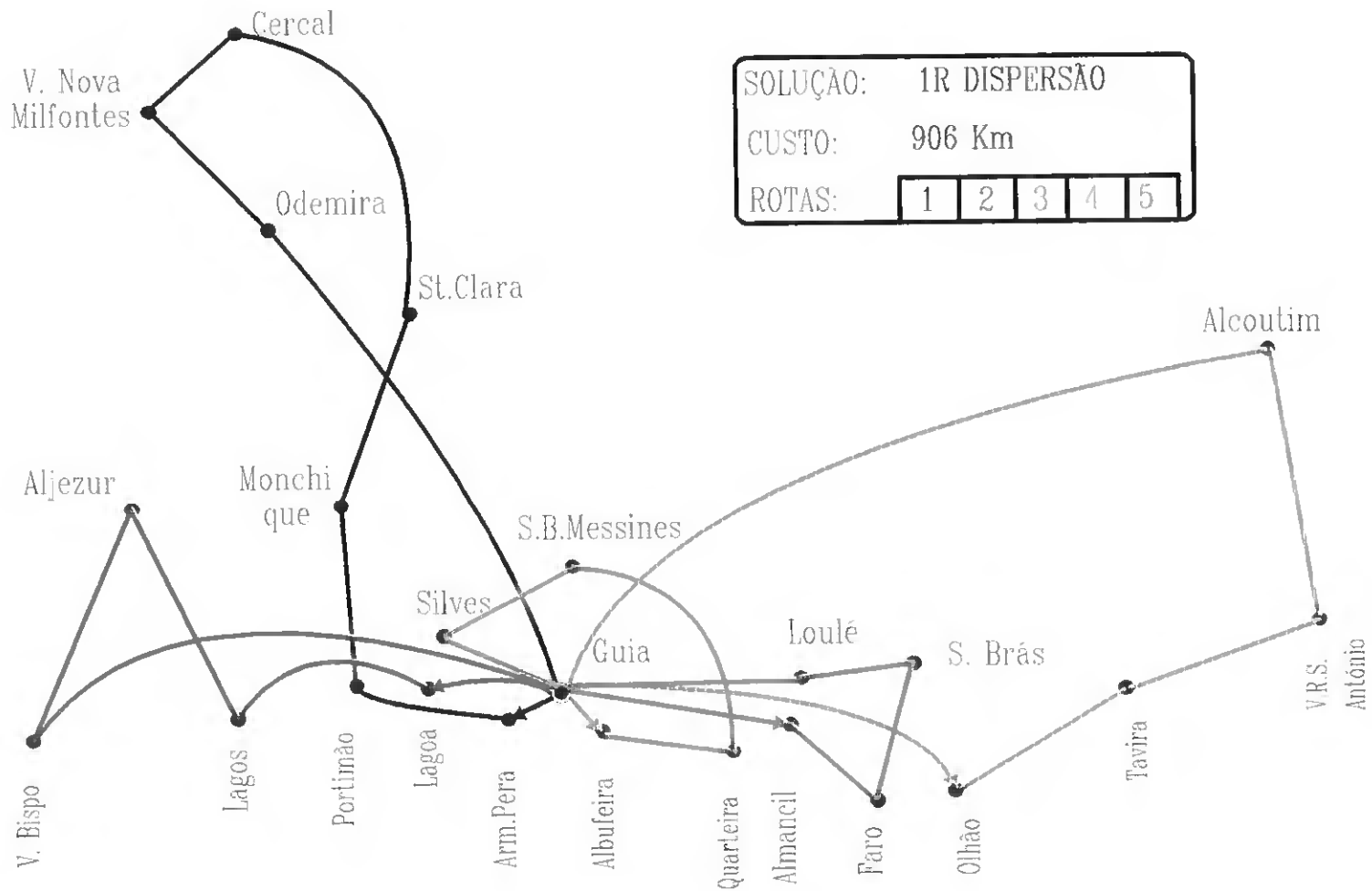


FIGURA 4.7

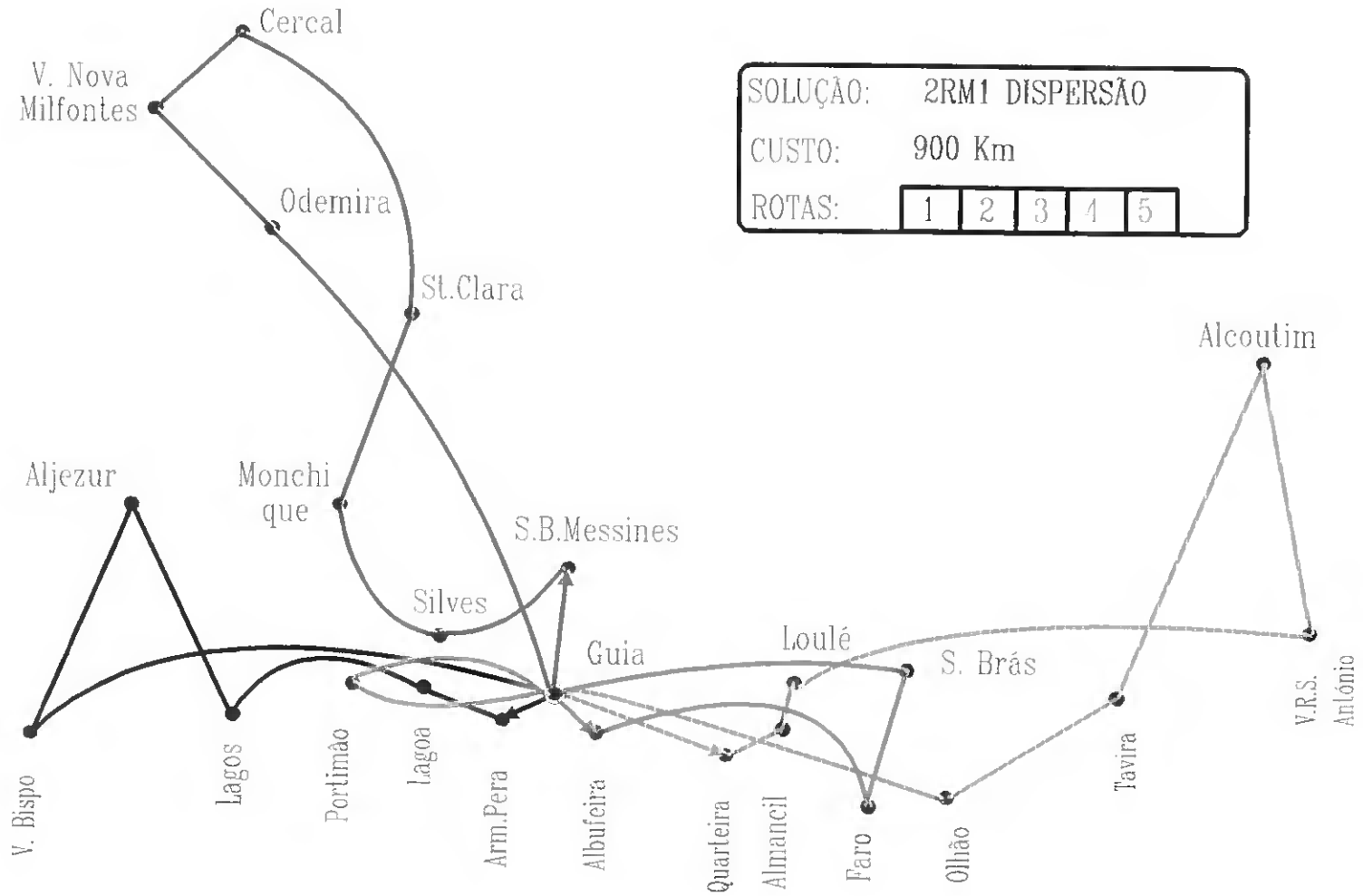


FIGURA 4.8

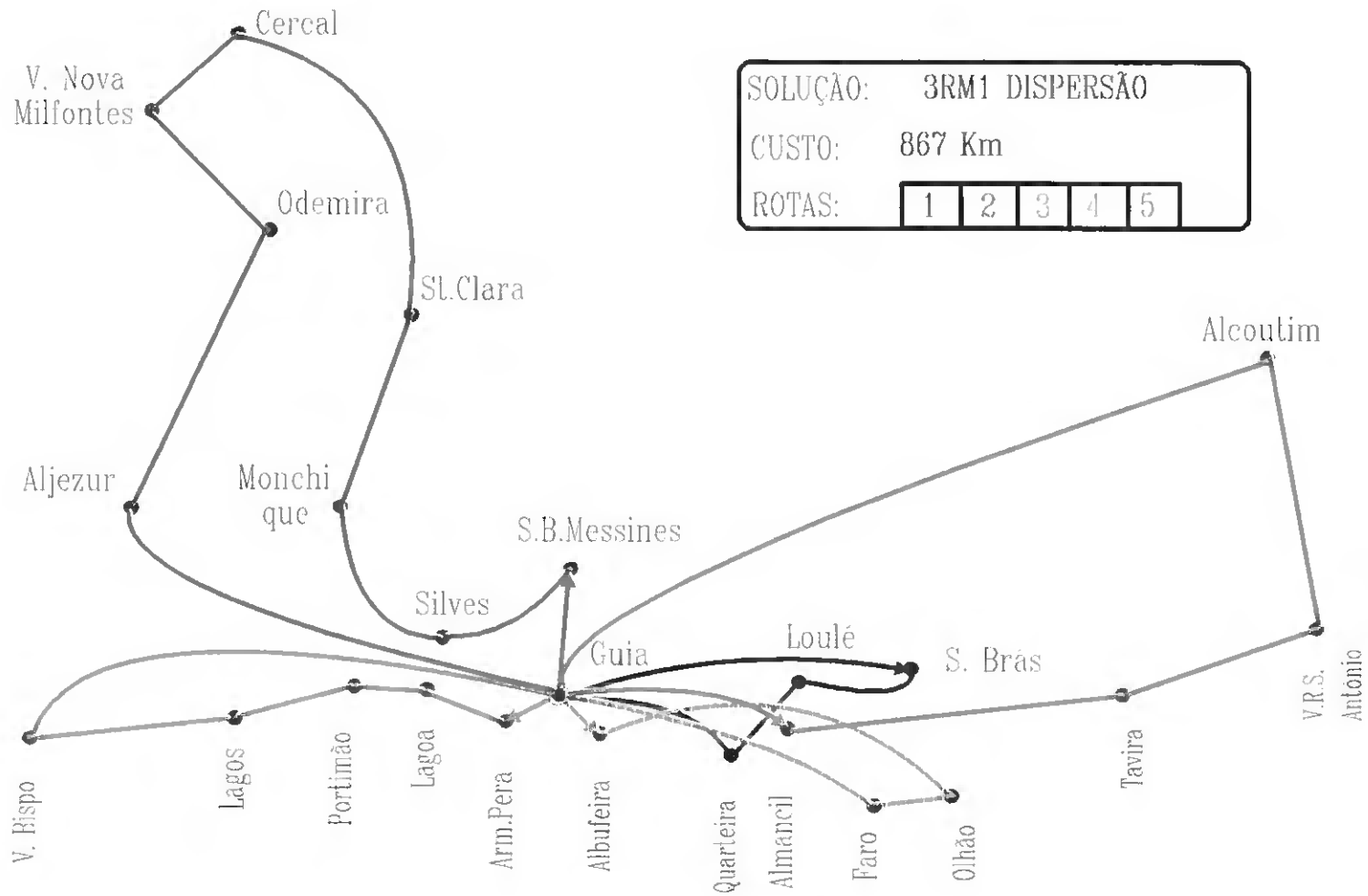


FIGURA 4.9

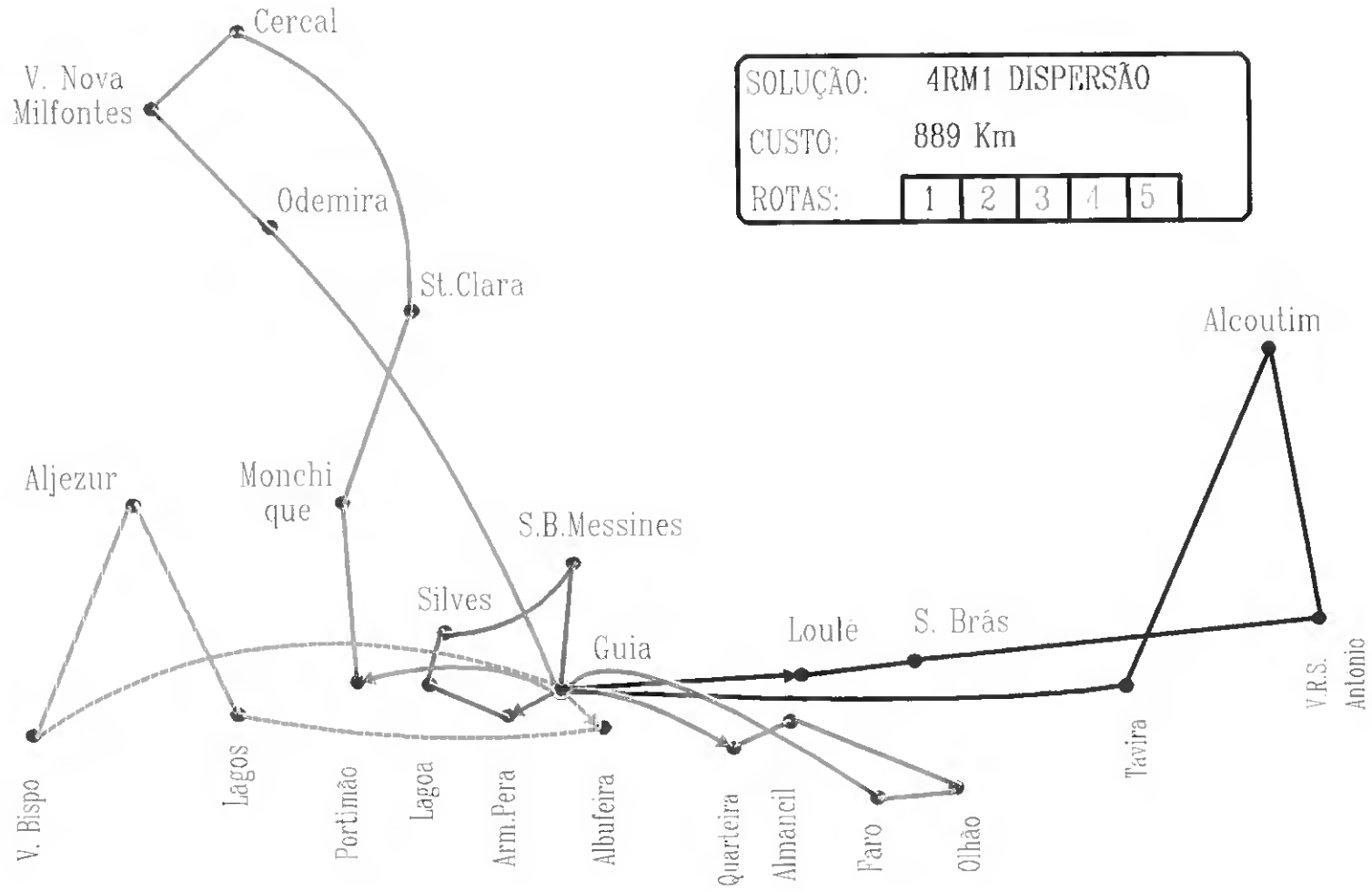


FIGURA 4.10

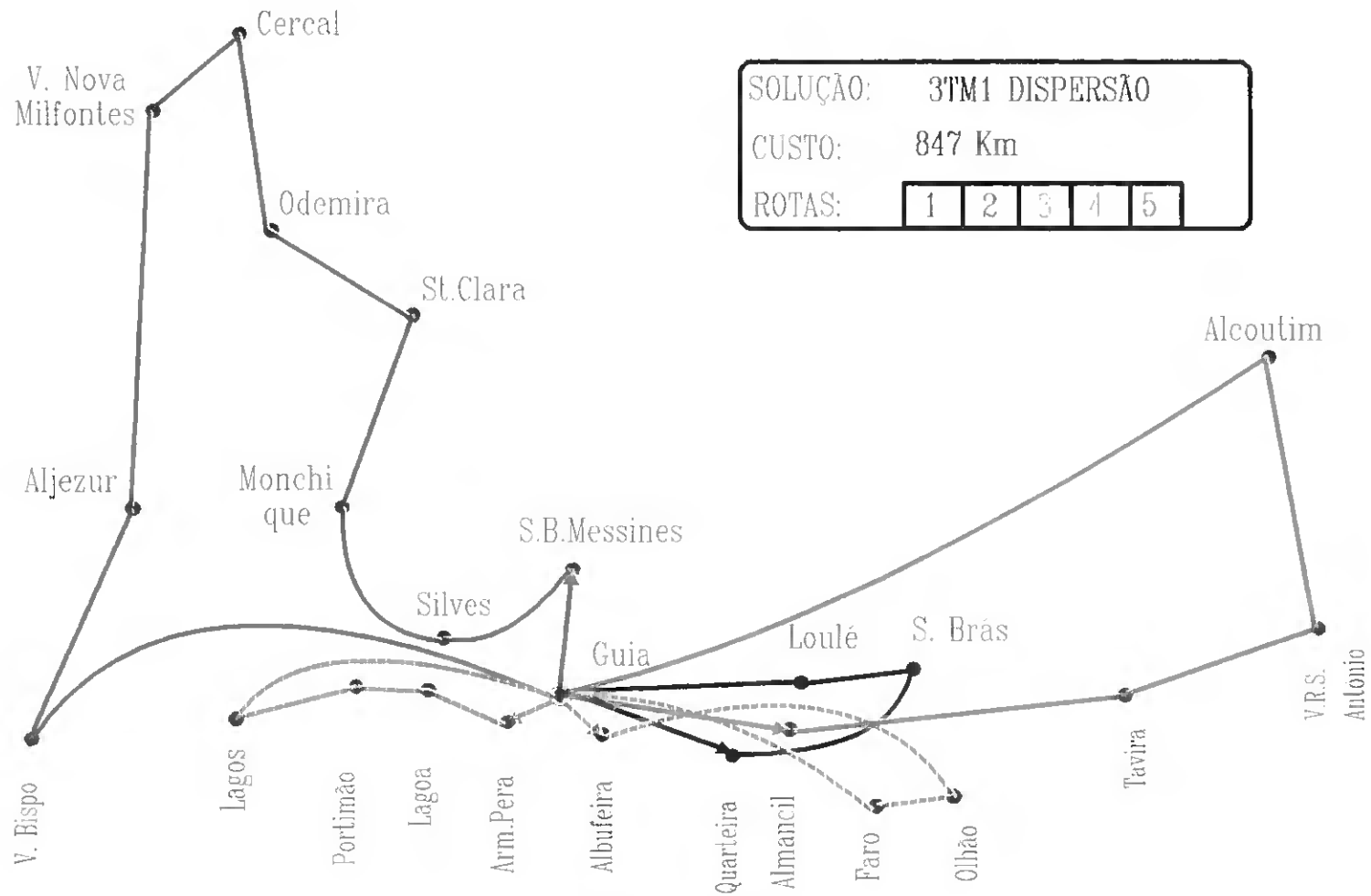


FIGURA 4.11

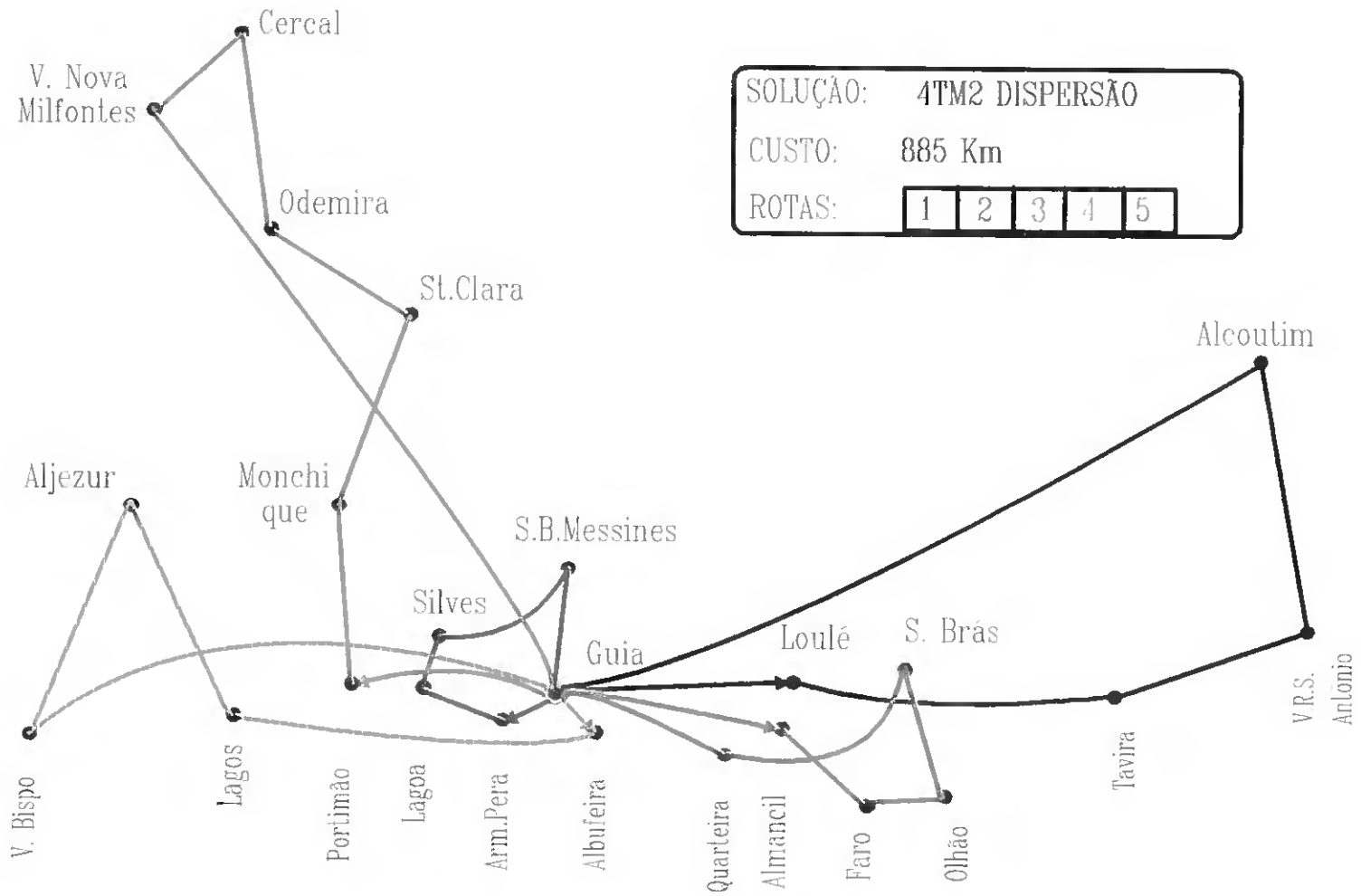


FIGURA 4.12

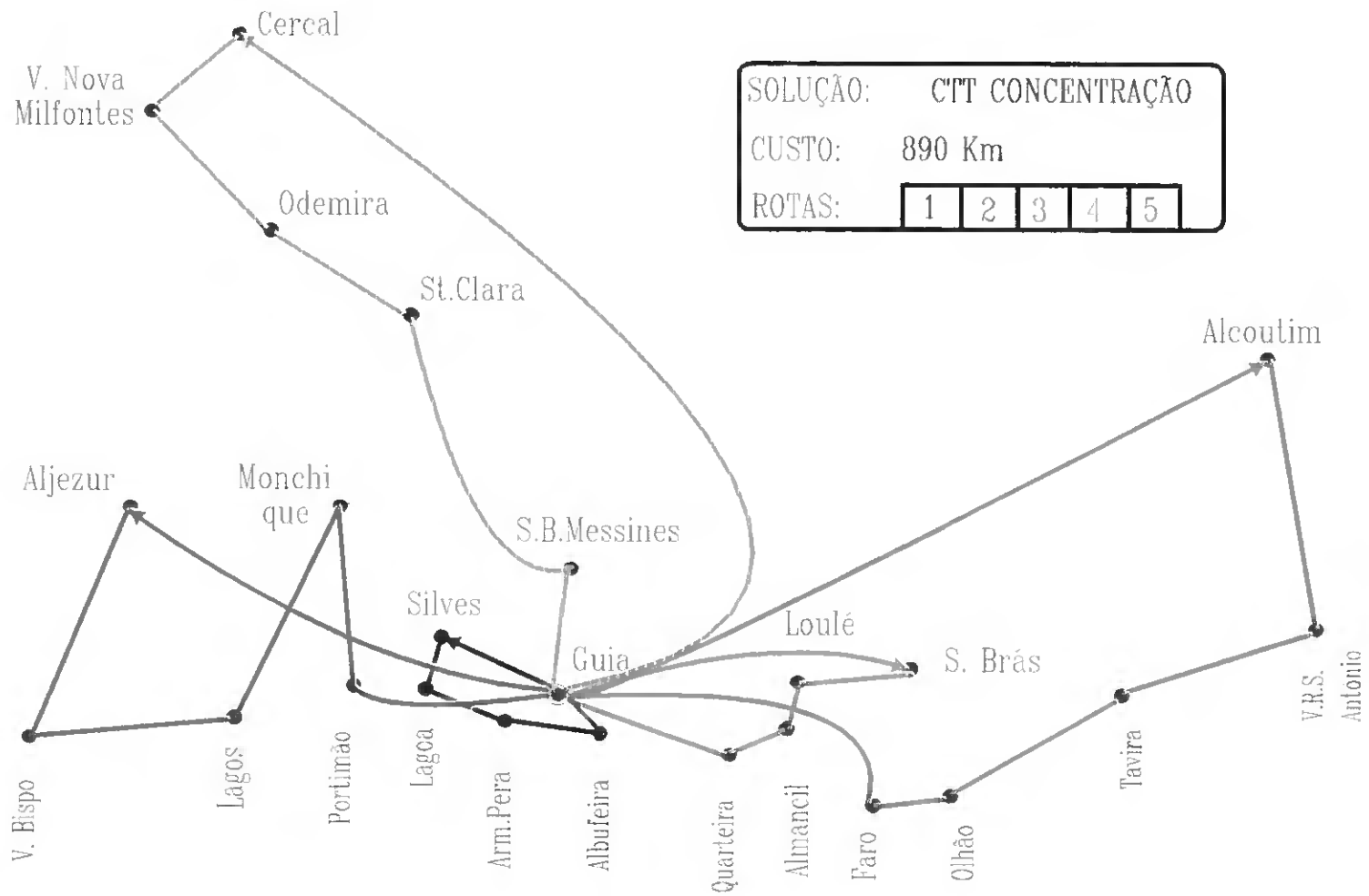


FIGURA 4.13

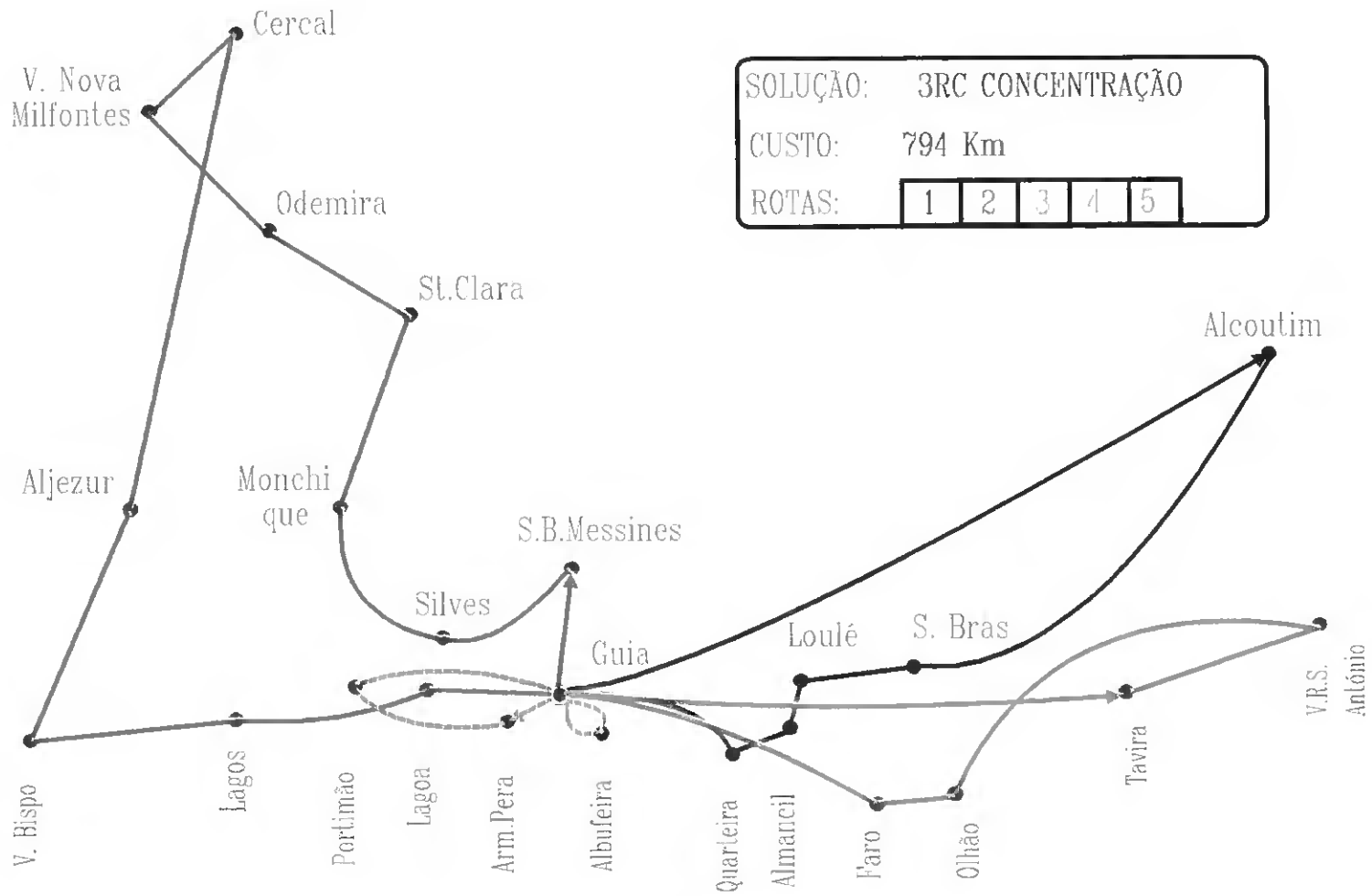


FIGURA 4.14

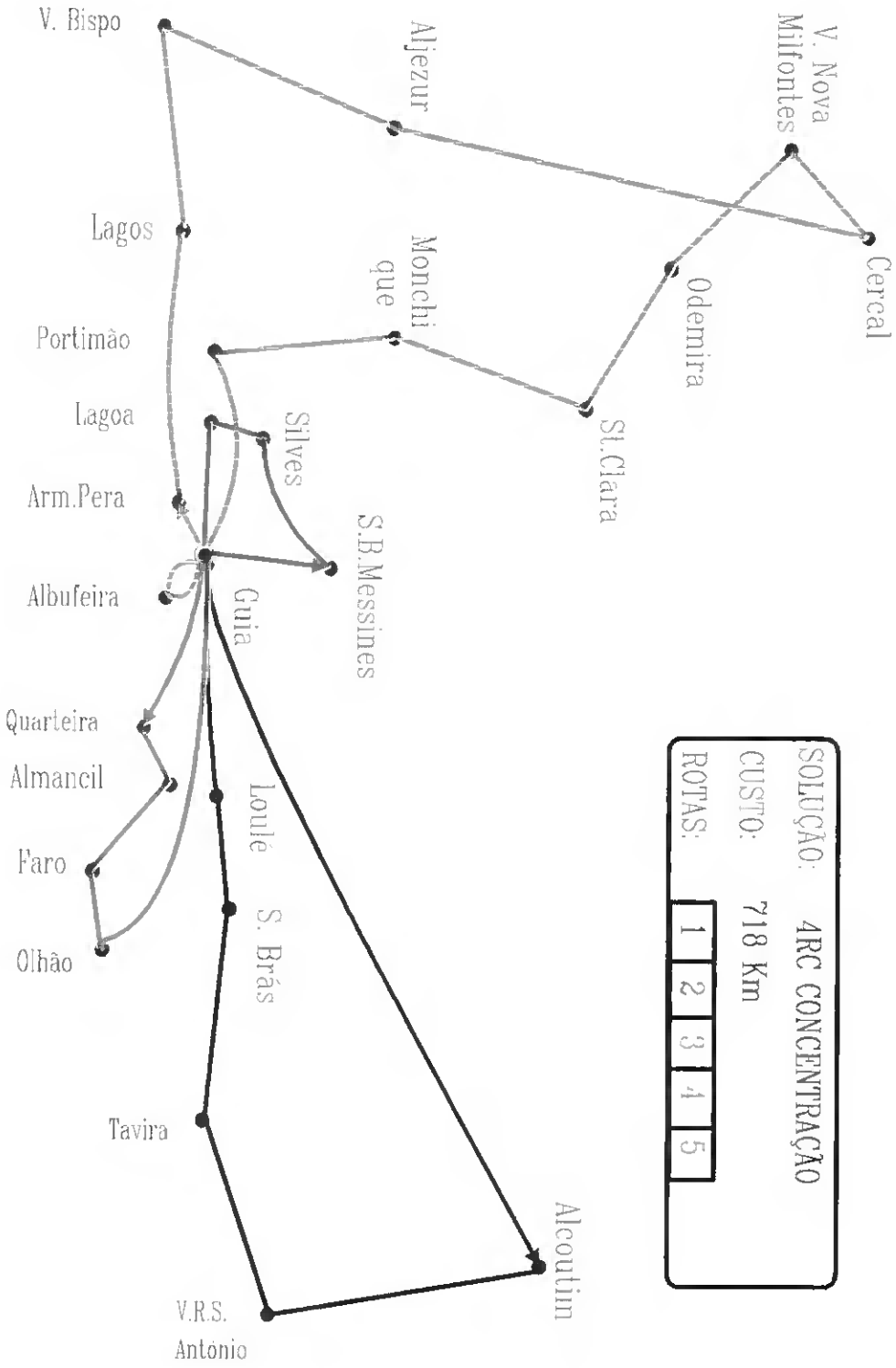


FIGURA 4.15

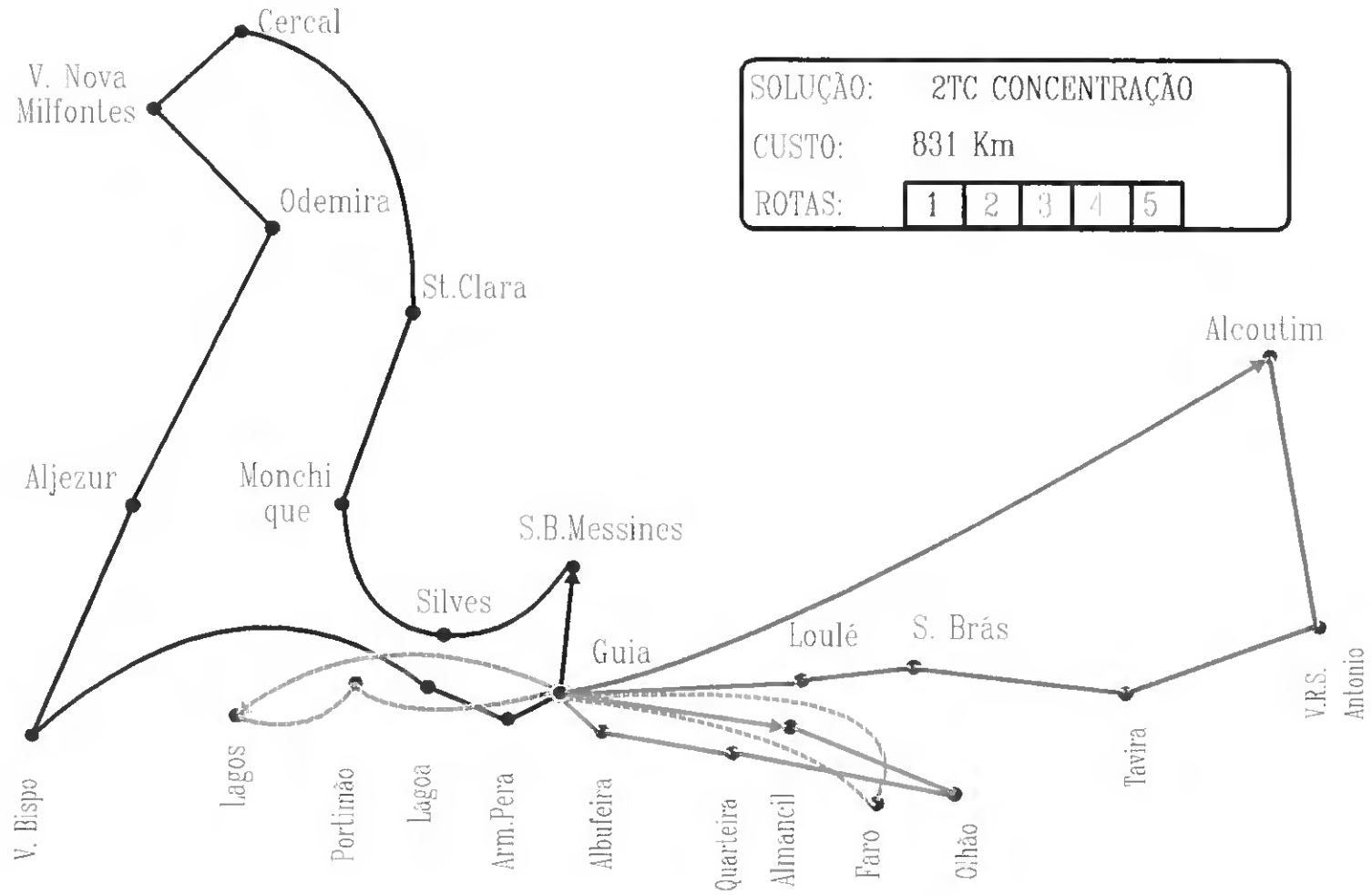


FIGURA 4.16

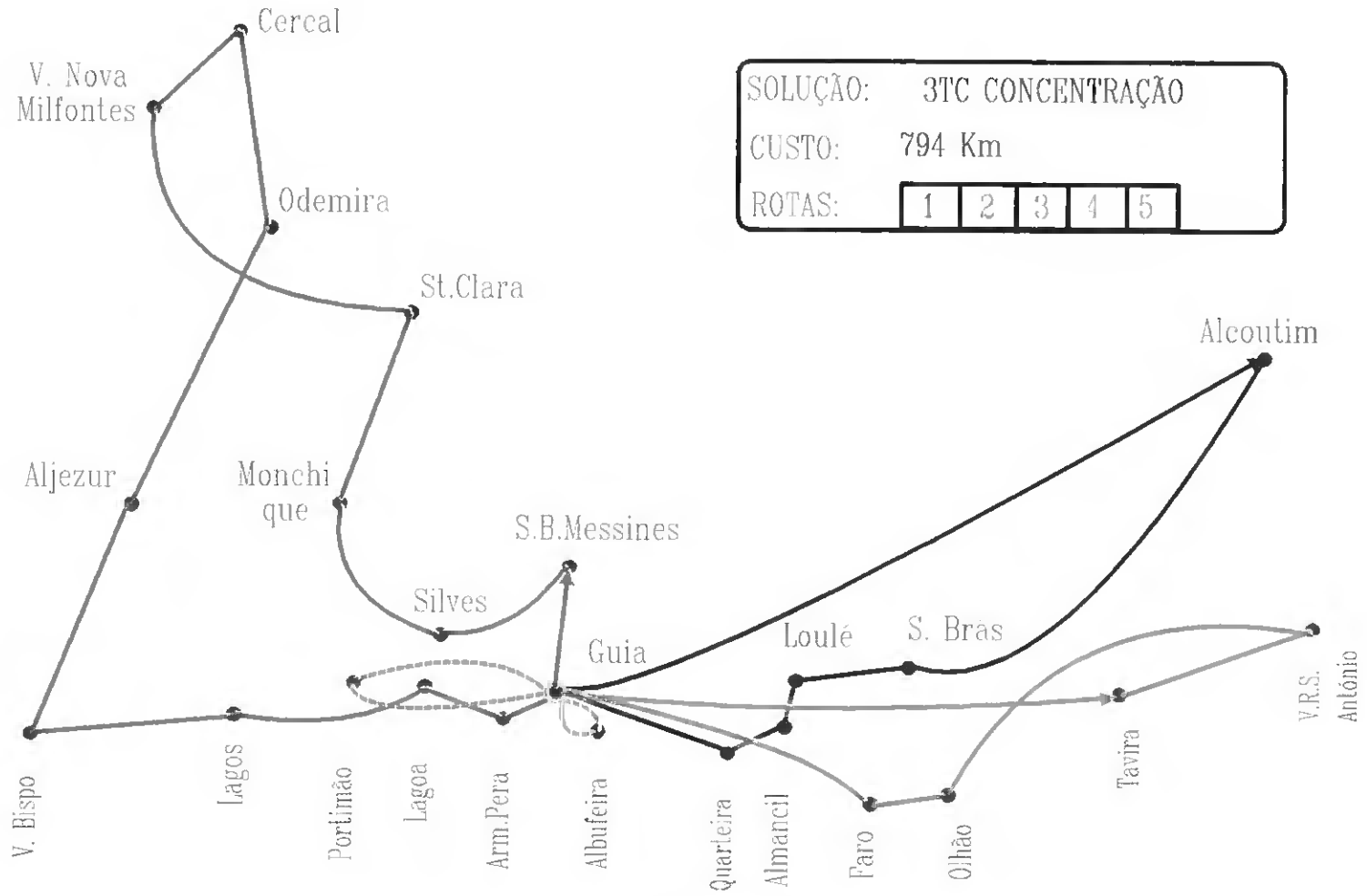


FIGURA 4.17

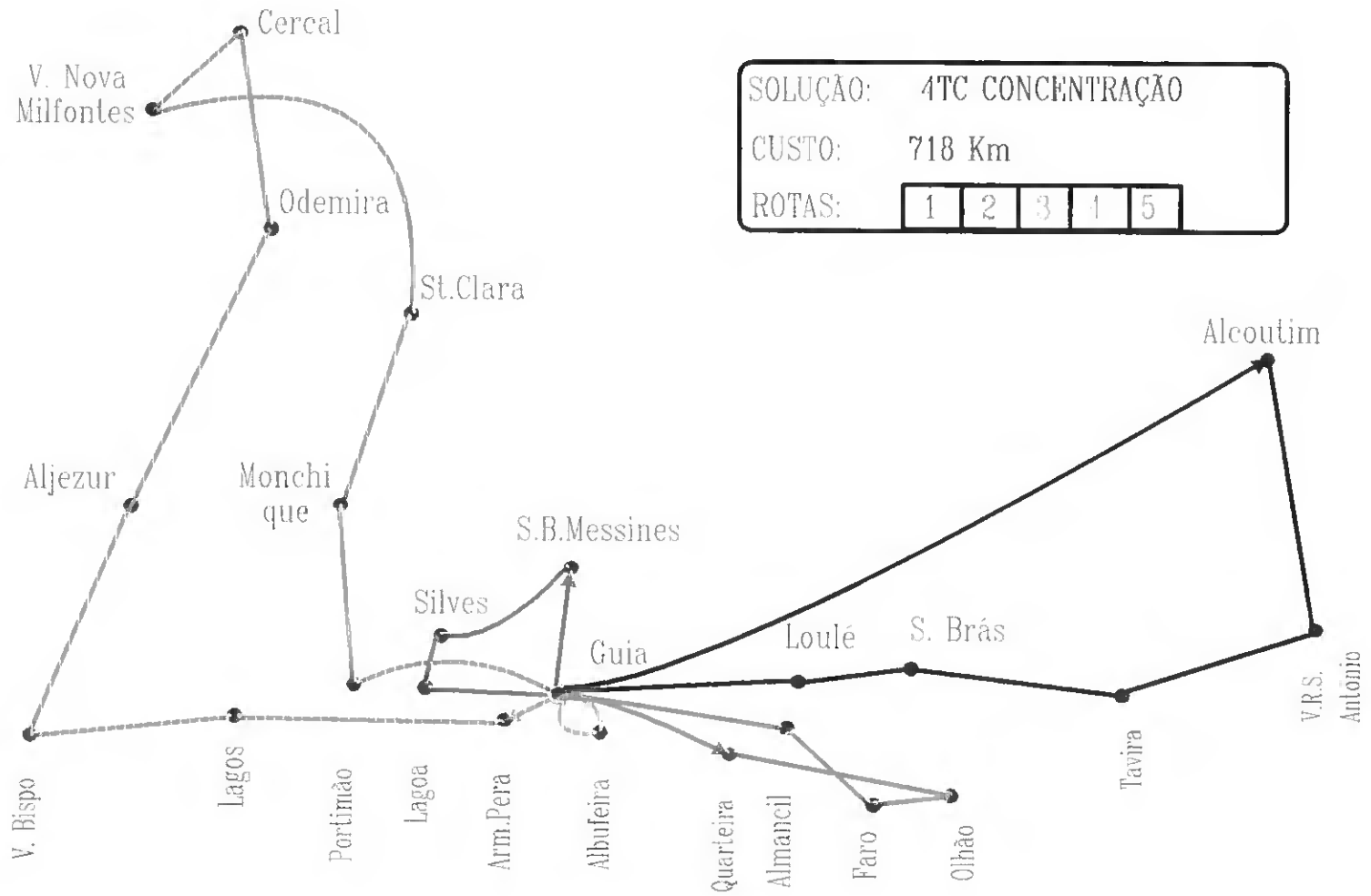


FIGURA 4.18

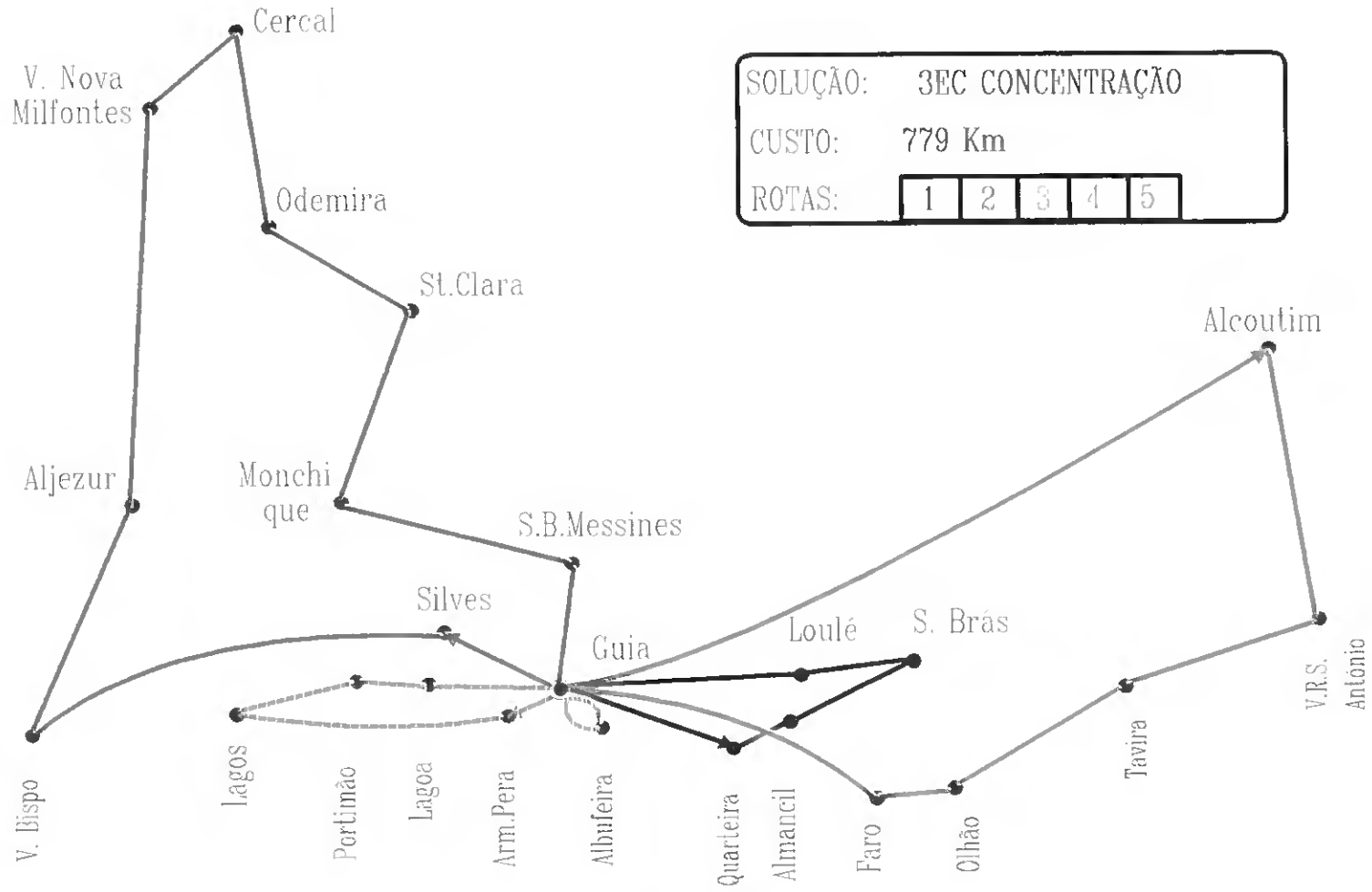


FIGURA 4.19

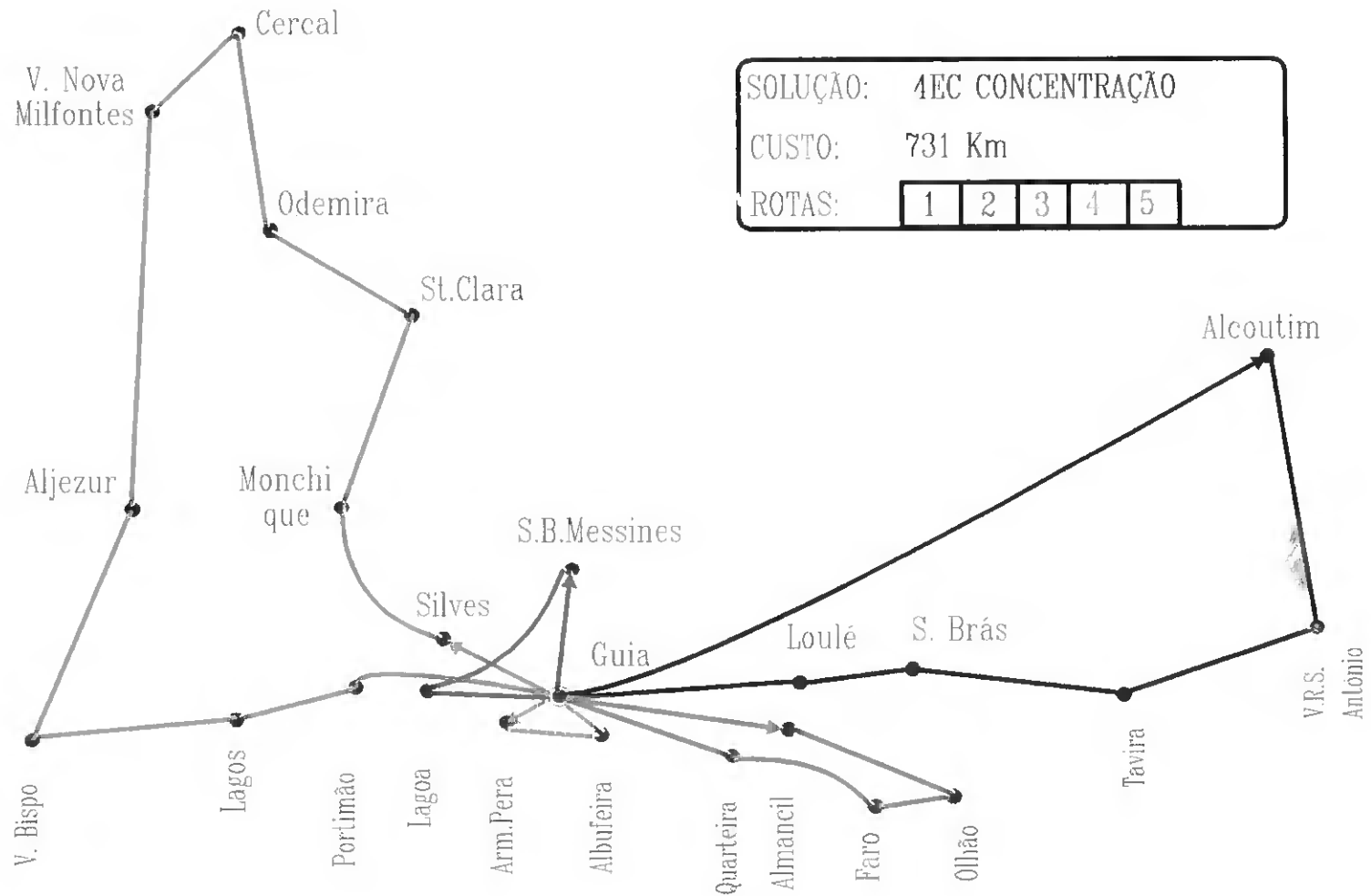


FIGURA 4.20

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme anteriormente se referiu (Ver ponto 4.3 - Tratamento dos Dados), a procura total dos CDP's é de 64.95 m³ e a capacidade volumétrica de carga do tipo de viaturas existente é de 23 m³/cada, verificando-se a possibilidade de servir os 23 CDP's com uma frota mínima de três veículos, o que se traduz numa taxa de utilização da capacidade disponível de aproximadamente 94%. Face às restrições de capacidade existentes é então possível resolver o problema com a utilização de apenas três veículos. No entanto, executaram-se os algoritmos com 3 e 4 veículos e obtiveram-se resultados (não apresentados) de fraca qualidade, em virtude das restrições temporais dos CDP's condicionarem "fortemente" o problema sendo, portanto, necessárias 5 viaturas para obter soluções admissíveis ou de qualidade aceitável, conforme se refere no ponto 4.5 (Resultados).

As metodologias adoptadas na resolução do problema conduziram a bons resultados, tanto numa óptica de custos como numa óptica de qualidade de serviço, em comparação com a actual Rede dos Correios (CTT). No entanto, outras soluções poderiam ter sido obtidas se em vez dos métodos de pós-optimização temporal adoptados (referidos em Nygard et al (1988)) fossem utilizadas outras formas de inclusão das restrições temporais, como por exemplo:

- **Na formalização inicial:** Introduzir as Restrições Temporais na formulação, as quais seriam verificadas em simultâneo com as Restrições de Capacidade dos Veículos, a cada passo do processo de resolução.
- **Na selecção das "sementes":** Solomon (1987) propõe que os clientes não servidos (de uma solução inicial) sejam definidos como "sementes" (ponto 3.3.4) e Nygard et al (1988) referem métodos de deslocamento das "sementes" em direcção aos clientes não servidos (ou em sentido contrário) (ponto 3.3.5). Em ambos os casos, o processo de optimização é reiniciado considerando os novos clientes "semente", o que conduz a novas afectações dos clientes aos veículos e, conseqüentemente, a novas configurações das rotas.

- *Na função objectivo:* Através da inclusão das características temporais do problema (em conjunto com as geográficas) na medida dos "custos de inserção", conforme é indicado por Solomon (1987) (Ver ponto 3.3.2).

Nesses casos, tratar-se-ia da resolução de um problema de optimização de rotas em que as restrições temporais adicionais são tidas em conta no início do processo de resolução.

Por outro lado, uma abordagem alternativa para a resolução do problema, referida em Semet and Taillard (1993), seria a aplicação da meta-heurística de Pesquisa Tabu, obtendo-se pela sua aplicação um maior e mais diversificado conjunto de soluções.

Seria pois interessante, como desenvolvimento futuro do presente trabalho, analisar e comparar os resultados obtidos pelos métodos utilizados e os que seriam produzidos pelas metodologias alternativas atrás referidas.

Relativamente ao Problema Prático é de salientar que o presente estudo foi dirigido para a Optimização das Rotas dos Veículos da Rede Secundária da Região Sul, o que constitui uma parcela do Problema Global de Optimização da Rede de Distribuição da Empresa.

Neste sentido, outro tipo de Problemas e Objectivos devem ser considerados na "definição" da Rede Nacional de Distribuição, como por exemplo a selecção dos CDP's que integram cada Região, a dimensão e tipologia da frota a utilizar, a localização dos Centros de Tratamento de Correio, entre outros.

Os resultados obtidos na resolução desses Problemas constituem os "dados" de partida (CDP's abrangidos, CTC, nº e tipo de veículos) utilizados nos processos de optimização de rotas aplicados à Região Sul, pelo que são de extrema importância no tipo e qualidade das respectivas soluções finais.

Na aplicação realizada considerou-se que a Região Sul abrange 23 CDP's, o Depósito Central se situa na Guia e a frota é composta por 5 viaturas de 23 m³ de capacidade (cada), conforme definido pela Empresa (Ver Anexo 1D), no entanto, a aplicação de métodos de optimização na resolução dos Problemas referidos poderá conduzir a "melhorias" tanto na Rede Global como na Rede Secundária da Região Sul, pelo que se considera ser um trabalho complementar a desenvolver numa

abordagem focalizada na resolução do Problema da Rede Nacional de Distribuição da Empresa.

Por último, é de salientar que os tempos gastos na execução das implementações computacionais dos métodos de Christofides et al e de Fisher e Jaikumar (com a inclusão dos procedimentos de pós-optimização temporal) - realizadas num PC Tipo 386 DX - foram, respectivamente, de 6.97 e 15.32 segundos (para os piores casos).

Esse facto permite a utilização desses programas para resolução de novos problemas (por exemplo, a sua aplicação às Redes Secundárias das restantes Regiões existentes) ou ainda para efectuar vários testes na aplicação corrente (por exemplo, alteração do conjunto de CDP's que constituem a Região Sul, mudança de localização do Depósito Central, etc.) com um dispendio de tempo que se pode considerar irrelevante (15 seg., no máximo).

ANEXOS

ANEXO 1

ELEMENTOS DISPONIBILIZADOS PELA DIRECÇÃO REGIONAL DE
CORREIOS DO ALGARVE

TRÁFEGO MÉDIO DIÁRIO (Nº OBJECTOS)

CDP's	CORRESPONDÊNCIA	ENCOMENDAS	TRÁFEGO TOTAL
1- ALBUFEIRA	18005	185	18190
2 - ALCOUTIM	893	5	898
3 - ALJEZUR	1419	18	1437
4 - ALMANCIL	4765	52	4817
5 - ARMAÇÃO PERA	4625	80	4705
6 - CERCAL	1173	21	1194
7 - FARO	27452	427	27879
8 - LAGOA	6492	89	6581
9 - LAGOS	11100	166	11266
10 - LOULÉ	13708	215	13923
11 - MONCHIQUE	2055	32	2087
12 - ODEMIRA	4554	129	4683
13 - OLHÃO	12346	192	12538
14 - PORTIMÃO	22238	442	22680
15 - QUARTEIRA	6974	111	7085
16 - S. BRÁS	2868	42	2910
17 - ST. CLARA	590	10	600
18 - S.B.MESSINES	3258	32	3290
19 - SILVES	3330	70	3400
20 - TAVIRA	8604	175	8779
21 - V.N.MILFONTES	876	10	886
22 - V.R.S. ANTÓNIO	7426	111	7537
23 - V.BISPO	1659	45	1704

CORRESPONDÊNCIA

Percentagens de tráfego e tipologia

CORRESPONDÊNCIA	PERCENTAGEM (%)
FINOS	75
GROSSOS	25

CORRESPONDÊNCIA				
TIPO DE CASSETE	DIMENSÕES (Cm)	CAPACIDADE (Nº DE OBJECTOS)		
		MIN	MÁX	MÉD
FINOS MOD. T11	13 X 28 X 50	550	700	625
GROSSOS MOD. T215	30 X 34 X 50	300	400	350

ENCOMENDAS

Percentagens de tráfego e tipologia

ENCOMENDAS		
TIPO DE ENCOMENDA	DIMENSÕES MÉDIAS [Cm]	PERCENTAGEM DE TRÁFEGO [%]
PEQUENAS	15 x 25 x 35	75
GRANDES	25 x 35 x 50	25

DOTAÇÃO DE CARTEIROS (CRT)

CDP	CRT	
	DOTAÇÃO	EXISTÊNCIA
CERCAL	2	2
ODEMIRA	7	9
STA. CLARA-A-VELHA	2	2
V. N. MILFONTES	2	2

NOTA: O número de carteiros utilizado nos cálculos realizados no presente trabalho é o que efectivamente existe em cada um dos Centros de Distribuição Postal (CDP), ou seja:

- QUADRO ANTERIOR: Valores indicados na coluna "EXISTÊNCIA"
- QUADROS SEGUINTEs: Soma dos valores expressos nas colunas "E" de "EC" + "CARC", correspondentes ao grupo profissional "CRT", para cada um dos CDP's

RADF3 EC'S	EC			CARC			EC			CARC		
	TEX			TEX			CRT			CRT		
	D	E	S	D	E	S	D	E	S	D	E	S
ALBUFEIRA *	6	6	0	1	1	0	21	10	-11	3	9	6
ALCANTARILHA	1	1	0			0			0			0
ALGOZ	1	1	0			0	0	1	1			0
AREIAS S.JOAO	4	3	-1			0			0			0
ARMAÇAO PERA	4	2	-2	1	1	0	7	3	-4	1	2	1
CERRO ALAGOA	6	5	-1	1	0	-1			0			0
FERRAGUDO	1	1	0			0			0			0
LAGOA(ALGARVE)	6	4	-2	1	1	0	11	10	-10	1	1	0
PADERNE	1	1	0			0			0			0
P.CARVOEIRO	1	1	0			0			0			0
S.B.MESSINES	3	2	-1	0	1	1	5	4	-1	1	1	0
S.MARCOS SERRA	0	0	0	0	0	0	0	2	2			0
SILVES	3	1	-2	0	4	4	6	7	1	0	0	0
TUNES-GARÉ	1	0	-1	0	0	0	0	1	1			0
TOTAL	38	28	-10	4	8	4	50	39	-11	6	13	7

*INCLUIDOS 2 TEX CDP

CONDICIONADOS			
TEX		CRT	

1 SILV	N	1 ALBUF	N
		2 A.PERA	N @
		1 LAGOA	N
		1 SB MES	N
		1 SILV	N

1 (N)	6 (N)
-------	-------

@ 1 CRT p/deslig.

N-nao ocupa P.T.
S-ocupa P.T.

RADF2 EC'S	EC			CARC			EC			CARC		
	TEX			TEX			CRT			CRT		
	D	E	S	D	E	S	D	E	S	D	E	S
AEROPORTO(FARO)	1	1	0			0			0			0
ALMANCIL	5	2	-3	0	2	2	6	6	0	1		-1
ALPORTEL	1	1	0			0			0			0
ALTE	1	1	0			0			0			0
BOLIQUEIME	1	1	0			0			0			0
FARO *	20	17	-3	3	7	4	39	26	-13	4	12	8
ESTOI	1	1	0			0			0			0
LOULE *	10	7	-3	2	1	-1	23	14	-9	3	10	7
PONTINHA(FARO)	6	6	0			0			0			0
QUARTEIRA *	7	7	0	0	2	2	11	9	-2	1	2	1
SANTA BARBARA DE NEXE	1	1	0			0			0			0
VILAMOURA	3	1	-2			0			0			0
TOTAL	57	46	-11	5	12	7	79	55	-24	9	24	15

* Incluídas chefias dos CDP

RADF1 EC'S	EC			CA			EC			CARC		
	TEX			TEX			CRT			CRT		
	D	E	S	D	E	S	D	E	S	D	E	S
ALCOUTIM	1	0	-1			0	2	1	-1			0
CASTRO MARIM	1	2	1			0			0			0
CACHOPO			0			0	0	3	3			0
FUSETA	1	1	0			0			0			0
LUZ(TAVIRA)	1	1	0			0			0			0
MONCARAPACHO	1	1	0			0			0			0
MONTE GORDO	2	2	0			0			0			0
OLHAO *	9	8	-1	1	2	1	18	12	-6	2	5	3
TAVIRA *	8	7	-1	0	0	0	16	4	-12	1	7	6
ITIN.TAVIRA	0	0	0			0	0	1	1			0
V.N.CACELA	2	2	0			0			0			0
VRS.ANTONIO *	8	8	0	1	4	3	15	12	-3	1	4	3
S.B.ALPORTEL	3	2	-1			0	5	5	0			0
TOTAL	37	33	-4	2	6	4	56	38	-18	4	16	12

* Incluídos 2 TEX CDP

CONDICIONADOS			
TEX		CRT	

1 OLH	N	1 CACHP	S
1 TAV	S	2 OLH	N
2 VRSA	S	1 SBALP	N
		2 TAV	1S-1N
		3 VRSA	2N-1S

4 (1N-3S)	9 (3S-6N)
-----------	-----------

N-nao ocupa P.T.
S-ocupa P.T.

RADF4 EC'S	EC			CARC			EC			CARC		
	TEX			TEX			CRT			CRT		
	D	E	S	D	E	S	D	E	S	D	E	S
ALJEZUR	2	1	-1			0	3	3	0			0
ALVOR	1	1	0			0			0			0
CALDAS DE MONCHIQUE			0			0			0			0
GIL EANES	3	3	0			0			0			0
LAGOS *	9	4	-5	1	3	2	17	10	-7	2	6	4
LUZ(LAGOS)	1	1	0			0			0			0
MEXILHOEIRA GRANDE	1	1	0			0			0			0
MONCHIQUE	2	1	-1			0	4	3	-1			0
ODECEIXE	1	1	0			0			0			0
PORTAS DE PORTUGAL	4	3	-1			0			0			0
PORTIMAO *	13	8	-5	3	5	2	30	22	-8	3	7	4
PRAIA DA ROCHA	2	2	0			0			0			0
TEIXEIRA GOMES	6	6	0			0			0			0
TORRALTA	1	1	0			0			0			0
VILA DO BISPO	2	1	-1			0	3	2	-1			0
VILA DE SAGRES	1	1	0			0			0			0
ITINERANTE LAGOS			0			0	1	1	0			0
TOTAL	49	35	-14	4	8	4	58	41	-17	5	13	8

* Incluidas chefias do CDP

DRD

DIRECÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO
DRD-ETD Estudos Técnicos de Distribuição

TEMPOS PARA ARRUAMENTO (Minutos)

1.- Correspondências Normais e Registadas

$$[\text{@IF}(N) < 0.21, ((-0.00011 * (N)) + 0.25), (85.9 + 0.055 * N)]$$

Obj	Mín	Obj	Mín	Obj	Mín	Obj	Mín	Obj	Mín	Obj	Mín	Obj	Mín	Obj	Mín
0	0	300	65	600	110	900	136	1200	152	1500	168	2100	201	2700	234
5	1	305	66	605	111	905	136	1205	152	1510	169	2110	202	2720	236
10	2	310	67	610	112	910	136	1210	152	1520	170	2120	203	2740	237
15	4	315	68	615	112	915	137	1215	153	1530	170	2130	203	2760	238
20	5	320	69	620	113	920	137	1220	153	1540	171	2140	204	2780	239
25	6	325	70	625	113	925	137	1225	153	1550	171	2150	204	2800	240
30	7	330	71	630	114	930	137	1230	154	1560	172	2160	205	2820	241
35	9	335	71	635	114	935	137	1235	154	1570	172	2170	205	2840	242
40	10	340	72	640	115	940	138	1240	154	1580	173	2180	206	2860	243
45	11	345	73	645	115	945	138	1245	154	1590	173	2190	206	2880	244
50	12	350	74	650	116	950	138	1250	155	1600	174	2200	207	2900	245
55	13	355	75	655	117	955	138	1255	155	1610	174	2210	207	2920	247
60	15	360	76	660	117	960	139	1260	155	1620	175	2220	208	2940	248
65	16	365	77	665	118	965	139	1265	155	1630	176	2230	209	2960	249
70	17	370	77	670	118	970	139	1270	156	1640	176	2240	209	2980	250
75	18	375	78	675	119	975	140	1275	156	1650	177	2250	210	3000	251
80	19	380	79	680	119	980	140	1280	156	1660	177	2260	210	3020	252
85	20	385	80	685	120	985	140	1285	157	1670	178	2270	211	3040	253
90	22	390	81	690	120	990	140	1290	157	1680	178	2280	211	3060	254
95	23	395	82	695	121	995	141	1295	157	1690	179	2290	212	3080	255
100	24	400	82	700	121	1000	141	1300	157	1700	179	2300	212	3100	256
105	25	405	83	705	122	1005	141	1305	158	1710	180	2310	213	3120	258
110	26	410	84	710	122	1010	141	1310	158	1720	181	2320	214	3140	259
115	27	415	85	715	123	1015	142	1315	158	1730	181	2330	214	3160	260
120	28	420	86	720	123	1020	142	1320	159	1740	182	2340	215	3180	261
125	30	425	86	725	123	1025	142	1325	159	1750	182	2350	215	3200	262
130	31	430	87	730	124	1030	143	1330	159	1760	183	2360	216	3220	263
135	32	435	88	735	124	1035	143	1335	159	1770	183	2370	216	3240	264
140	33	440	89	740	125	1040	143	1340	160	1780	184	2380	217	3260	265
145	34	445	89	745	125	1045	143	1345	160	1790	184	2390	217	3280	266
150	35	450	90	750	126	1050	144	1350	160	1800	185	2400	218	3300	267
155	36	455	91	755	126	1055	144	1355	160	1810	185	2410	218	3320	269
160	37	460	92	760	126	1060	144	1360	161	1820	186	2420	219	3340	270
165	38	465	92	765	127	1065	144	1365	161	1830	187	2430	220	3360	271
170	39	470	93	770	127	1070	145	1370	161	1840	187	2440	220	3380	272
175	40	475	94	775	128	1075	145	1375	162	1850	188	2450	221	3400	273
180	41	480	95	780	128	1080	145	1380	162	1860	188	2460	221	3420	274
185	42	485	95	785	128	1085	146	1385	162	1870	189	2470	222	3440	275
190	44	490	96	790	129	1090	146	1390	162	1880	189	2480	222	3460	276
195	45	495	97	795	129	1095	146	1395	163	1890	190	2490	223	3480	277
200	46	500	98	800	130	1100	148	1400	163	1900	190	2500	223	3500	278
205	47	505	98	805	130	1105	147	1405	163	1910	191	2510	224	3520	280
210	48	510	99	810	130	1110	147	1410	163	1920	192	2520	225	3540	281
215	48	515	100	815	131	1115	147	1415	164	1930	192	2530	225	3560	282
220	50	520	100	820	131	1120	148	1420	164	1940	193	2540	226	3580	283
225	51	525	101	825	131	1125	148	1425	164	1950	193	2550	226	3600	284
230	52	530	102	830	132	1130	148	1430	165	1960	194	2560	227	3620	285
235	53	535	102	835	132	1135	148	1435	165	1970	194	2570	227	3640	286
240	54	540	103	840	132	1140	149	1440	165	1980	195	2580	228	3660	287
245	55	545	104	845	133	1145	149	1445	165	1990	195	2590	228	3680	288
250	56	550	104	850	133	1150	149	1450	166	2000	196	2600	229	3700	289
255	57	555	105	855	133	1155	149	1455	166	2010	196	2610	229	3720	291
260	58	560	106	860	134	1160	150	1460	166	2020	197	2620	230	3740	292
265	59	565	106	865	134	1165	150	1465	166	2030	198	2630	231	3760	293
270	59	570	107	870	134	1170	150	1470	167	2040	198	2640	231	3780	294
275	60	575	107	875	135	1175	151	1475	167	2050	199	2650	232	3800	295
280	61	580	108	880	135	1180	151	1480	167	2060	199	2660	232	3820	296
285	62	585	109	885	135	1185	151	1485	168	2070	200	2670	233	3840	297
290	63	590	109	890	135	1190	151	1490	168	2080	200	2680	233	3860	298
295	64	595	110	895	136	1195	152	1495	168	2090	201	2690	234	3880	299

2. - Outros produtos

0,5 Min por objecto - VD + EMS + CORFAX + COBRANÇAS + PAGAMENTOS
2,0 Min por objecto - ENCOMENDAS AO DOMICÍLIO

3. - Conceitos

Inclui: Recolha, ordenação, intercalação e elaboração de maços
Arrumação de malas e ou de sacos de reabastecimento
Colocação na vistura

TEMPOS DE TRABALHO POR OPERAÇÕES

PREPARAÇÃO
TRATAMENTO
2

CDP _____

OPERAÇÕES SOBRE CORRESPONDÊNCIAS E "SFP"	OBJ	COEF- CIENTES	MINUTOS
ABERTURA DE MACOS/FACEAMENTO			
SEPARAÇÃO GERAL I		0,054	
SEPARAÇÃO GERAL I (feita por PT divisores - DA)		0,040	
SEPARAÇÃO GERAL II		0,050	
SEPARAÇÃO GERAL DE CORREIO REGISTADO		0,080	
SEPARAÇÃO GERAL DE RECIBOS E COBRANÇAS		0,080	
SEPARAÇÃO POR MÓDULO DE APARTADOS		0,060	
SEPARAÇÃO E INCLUSÃO EM APARTADOS		0,080	

OPERAÇÕES SOBRE ENCOMENDAS	OBJ	COEF- CIENTES	MINUTOS
AVISOS, ARRUMACAO BALCAO OU CARROS		1,000	

OUTRAS OPERAÇÕES	OBJ	COEF- CIENTES	MINUTOS

TOTAL _____

Rede de Transportes Postais

Projecto de Centralização no Nó da Guia (TPL301A)

Partidas e Chegadas da R1 e R2 no nó da Guia

1º Período			
R1 - Chegadas		R2 - Partidas	
Lisboa - Guia	3:25		
Évora - Guia	3:45		
Porto - Guia	4:35		
		Guia - VRS António	5:00
		Guia - Cercal	5:15
		Guia - Aljezur	5:20
		Guia - S. B. Alportel	5:30
		Periférica Guia	5:35

2º Período			
R2 - Chegadas		R1 - Partidas	
Periférica Guia	19:40		
Guia - Aljezur	19:50		
Guia - S. B. Alportel	20:30		
Guia - Cercal	20:43		
Guia - VRS António	20:45		
		Guia - Porto	21:15
		Guia - Évora	21:45
		Guia - Lisboa	23:00

Reformulação da R2 da Região Sul

Centralização no Nó da Guia

	DISPERSÃO			CONCENTRAÇÃO		
	HC	HP	TP	HC	HP	TP
8200 Albufeira	5:45	6:00	0:15	19:18	19:28	0:10
8670 Aljezur	8:05	8:25	0:20	16:50	16:55	0:05
8135 Aljancil	7:00	7:05	0:05	19:05	19:10	0:05
8365 Animação de Pera	6:20	6:30	0:10	18:45	18:55	0:10
7555 Cereal	8:00	8:05	0:05	17:55	18:00	0:05
8000 Faro	5:40	6:00	0:20	19:40	19:50	0:10
8400 Lagoa	6:45	6:55	0:10	18:25	18:30	0:05
8600 Lagos	6:35	6:55	0:20	18:10	18:25	0:15
8100 Loulé	6:05	6:15	0:10	18:40	18:50	0:10
7630 Odemira	7:07	7:15	0:08	18:43	18:48	0:05
8700 Ollhão	6:15	6:25	0:10	19:05	19:15	0:10
8500 Portimão	5:45	6:05	0:20	19:05	19:20	0:15
8125 Quarteira	6:35	6:45	0:10	19:30	19:40	0:10
8150 S. Braz Alportel	7:30	7:45	0:15	18:05	18:15	0:10
7665 S. Clara-a-Velha	6:25	6:28	0:03	19:27	19:30	0:03
8375 S.B. Messines	5:37	5:40	0:03	20:15	20:18	0:03
8300 Silves	7:10	7:20	0:10	18:05	18:10	0:05
8800 Tavira	6:50	7:00	0:10	18:35	18:45	0:10
7645 V. N. Milfontes	7:40	7:45	0:05	18:15	18:18	0:03
8900 V.R.S. António	7:30	7:40	0:10	17:55	18:05	0:10
8650 Vila do Bispo	7:20	7:30	0:10	17:35	17:45	0:10

8970 Alcoutim
7655 Colos
8550 Monchique

Mantêm a situação actual

Legenda:

HC - Hora de Chegada
HP - Hora de Partida
TP - Tempo de Paragem

REDE SECUNDÁRIA DO SUL

ANEXO 1D

Carreira:

Periférica da Guia

Valores totais - Disp.

Ocupação: 2:35

Km: 64

Média Traj.: 42.67

Dispersão

Viatura/tipo

CTT

FC23

N° de Obra

Paragens	TP (HH:mm)	TT (HH:mm)	HC (HH:mm)	HP (HH:mm)	Km	Média
Guia	0:10		5:25	5:35		
Albufeira	0:15	0:10	5:45	6:00	8	48.00
Armação de Pera	0:10	0:20	6:20	6:30	14	42.00
Lagoa	0:10	0:15	6:45	6:55	10	40.00
Silves	0:10	0:15	7:10	7:20	8	32.00
Guia	0:10	0:30	7:50	8:00	24	48.00

Valores totais - Conc.

Ocupação: 2:15

Km: 64

Média Traj.: 40.42

Concentração

Viatura/tipo

CTT

F23

N° de Obra

Paragens	TP (HH:mm)	TT (HH:mm)	HC (HH:mm)	HP (HH:mm)	Km	Média
Guia	0:05		17:30	17:35		
Silves	0:05	0:30	18:05	18:10	24	48.00
Lagoa	0:05	0:15	18:25	18:30	8	32.00
Armação de Pera	0:10	0:15	18:45	18:55	10	40.00
Albufeira	0:10	0:23	19:18	19:28	14	36.52
Guia	0:05	0:12	19:40	19:45	8	40.00

Totais (D+C):

Duração	4:50 h
Extensão	128 Km
Média Traj.	41.51 Km/h

Em vigor desde:

Observações:

REDE SECUNDÁRIA DO SUL

ANEXO ID

Carretera:

Valores totais - Disp.	
Ocupação:	5:00
Km:	111
Média Traj.:	49.33

Dispersão

Viatura/tipo: N° da Obra:

Paragens	TP (HH:mm)	TT (HH:mm)	HC (HH:mm)	HP (HH:mm)	Km	Média
Guia	1:30			3:50		
Portimão	0:20	0:25		5:45	20	48.00
Lagos	0:20	0:30		6:35	25	50.00
Vila do Bispo	0:10	0:25		7:20	23	55.20
Aljezur	0:20	0:35		8:05	27	46.29
Odeceixe	0:05	0:20		8:45	16	48.00

Valores totais - Conc.	
Ocupação:	4:25
Km:	111
Média Traj.:	42.97

Concentração

Viatura/tipo: N° da Obra:

Paragens	TP (HH:mm)	TT (HH:mm)	HC (HH:mm)	HP (HH:mm)	Km	Média
Odeceixe	0:05			16:25		
Aljezur	0:05	0:20		16:50	16	48.00
Vila do Bispo	0:10	0:40		17:35	27	40.50
Lagos	0:15	0:25		18:10	23	55.20
Portimão	0:15	0:40		19:05	25	37.50
Guia	1:00	0:30		19:50	20	40.00

Totais (D + C):	Duração	9:25 h
	Extensão	222 Km
	Média Traj.	45.93 Km/h

Em vigor desde:

Observações:

REDE SECUNDÁRIA DO SUL

Correia:

Guia/S. Brás de Alportel

Valores totais - Disp.

Ocupação: 3:45
 Km: 71
 Média Traj.: 44.84

Viatura/tipo

EXT

F23

N° de Obra

Dispersão

Paragens	TP (HH:mm)	TT (HH:mm)	HC (HH:mm)	HP (HH:mm)	Km	Média
Guia	1:30		4:00	5:30		
Loulé	0:10	0:35	6:05	6:15	30	51.43
Quarteira	0:10	0:20	6:35	6:45	12	36.00
Almancil	0:05	0:15	7:00	7:05	9	36.00
S. Brás de Alportel	0:15	0:25	7:30	7:45	20	48.00

Valores totais - Conc.

Ocupação: 3:25
 Km: 58
 Média Traj.: 31.64

Viatura/tipo

EXT

F23

N° de Obra

Concentração

Paragens	TP (HH:mm)	TT (HH:mm)	HC (HH:mm)	HP (HH:mm)	Km	Média
S. Brás de Alportel	0:10		18:05	18:15		
Loulé	0:10	0:25	18:40	18:50	15	36.00
Almancil	0:05	0:15	19:05	19:10	9	36.00
Quarteira	0:10	0:20	19:30	19:40	9	27.00
Guia	1:00	0:50	20:30	21:30	25	30.00

Totais (D + C):

Duração 7:10 h
 Extensão 129 Km
 Média Traj. 37.76 Km/h

Em vigor desde:

Observações:

ANEXO 1D

REDE SECUNDÁRIA DO SUL

Carreira:

Guia/Cercal

Valores totais - Disp.

Ocupação: 4:20

Km: 138

Média Traj.: 56.71

Dispersão

Viatura/tipo

EXT

F23

N° de Obra

Paragens	TP (HH:mm)	TT (HH:mm)	HC (HH:mm)	HP (HH:mm)	Km	Média
Guia	1:30		3:45	5:15		
S. B. Messines	0:03	0:22	5:37	5:40	18	49.09
Stª Clara-a-Velha	0:03	0:45	6:25	6:28	46	61.33
Odemira	0:08	0:39	7:07	7:15	32	49.23
V. N. Milfontes	0:05	0:25	7:40	7:45	27	64.80
Cercal	0:05	0:15	8:00	8:05	15	60.00

Valores totais - Conc.

Ocupação: 3:48

Km: 138

Média Traj.: 55.57

Concentração

Viatura/tipo

EXT

F23

N° de Obra

Paragens	TP (HH:mm)	TT (HH:mm)	HC (HH:mm)	HP (HH:mm)	Km	Média
Cercal	0:05		17:55	18:00		
V. N. Milfontes	0:03	0:15	18:15	18:18	15	60.00
Odemira	0:05	0:25	18:43	18:48	27	64.80
Stª Clara-a-Velha	0:03	0:39	19:27	19:30	32	49.23
S.B. Messines	0:03	0:45	20:15	20:18	46	61.33
Guia	1:00	0:25	20:43	21:43	18	43.20

Totais (D + C):

Duração	8:08 h
Extensão	276 Km
Média Traj.	56.14 Km/h

Em vigor desde:

Observações:

REDE SECUNDÁRIA DO SUL

Carreira:

Guia/Vila Real de St^o. António

Valores totais - Disp.

Ocupação: 2:55

Km: 97

Média Traj.: 52.91

Viatura/tipo

CTT

F45

N^o de Obra

Dispersão

Paragens	TP (HH:mm)	TT (HH:mm)	HC (HH:mm)	HP (HH:mm)	Km	Média
Guia	0:15		4:45	5:00	39	58.50
Faro	0:20	0:40	5:40	6:00	11	44.00
Olhão	0:10	0:15	6:15	6:25	22	52.80
Tavira	0:10	0:25	6:50	7:00	25	50.00
V.R.St ^o António	0:10	0:30	7:30	7:40		

Valores totais - Conc.

Ocupação: 3:05

Km: 97

Média Traj.: 44.77

Viatura/tipo

CTT

F45

N^o de Obra

Concentração

Paragens	TP (HH:mm)	TT (HH:mm)	HC (HH:mm)	HP (HH:mm)	Km	Média
V.R.St ^o António	0:10		17:55	18:05	25	50.00
Tavira	0:10	0:30	18:35	18:45	22	66.00
Olhão	0:10	0:20	19:05	19:15	11	26.40
Faro	0:10	0:25	19:40	19:50	39	42.55
Guia	0:15	0:55	20:45	21:00		

Totais (D+C):

Duração 6:00 h
Extensão 194 Km
Média Traj. 48.50 Km/h

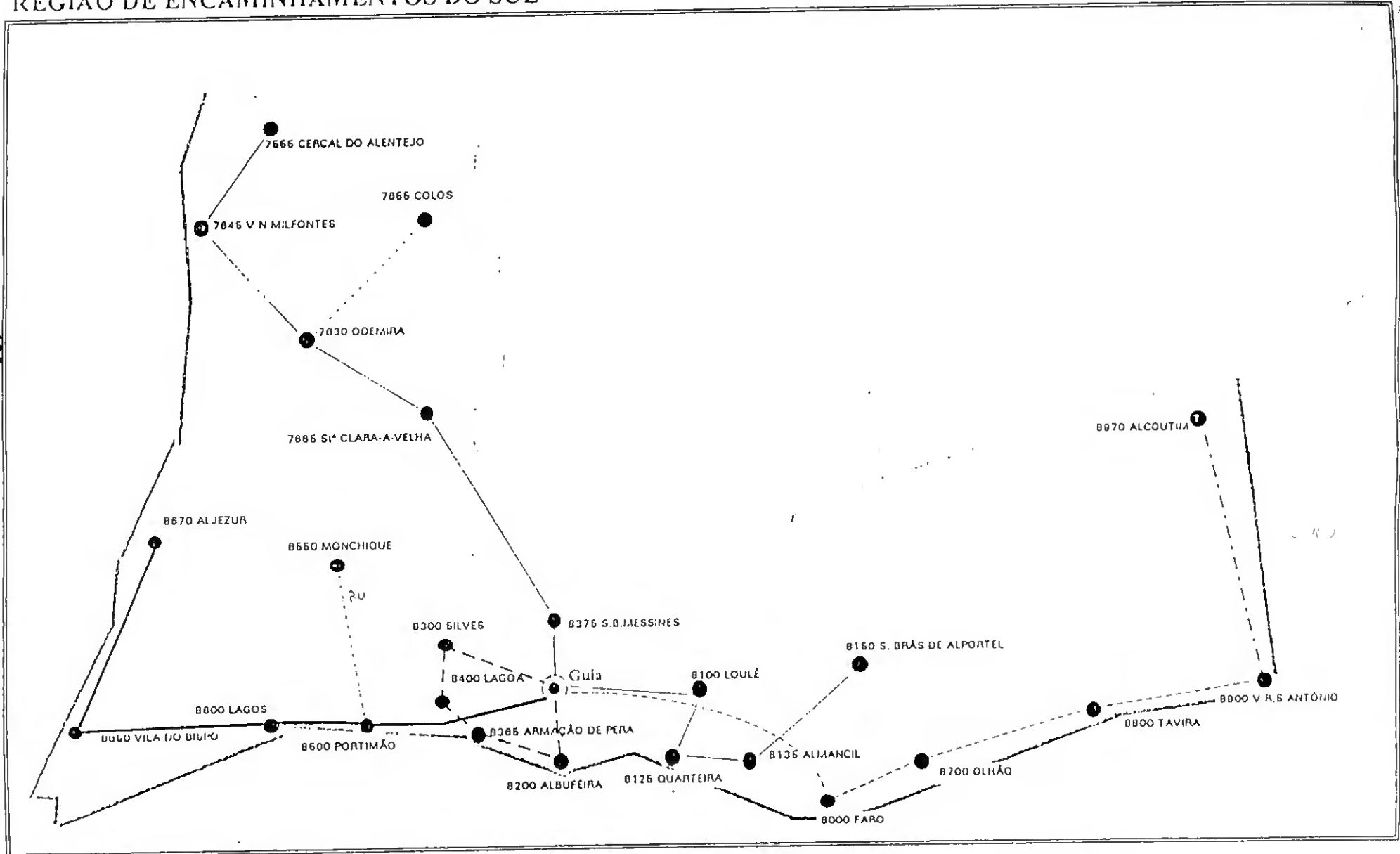
Em vigor desde:

Observações:

REGIÃO DE ENCAMINHAMENTOS DO SUL

Carreiras / Dispersão

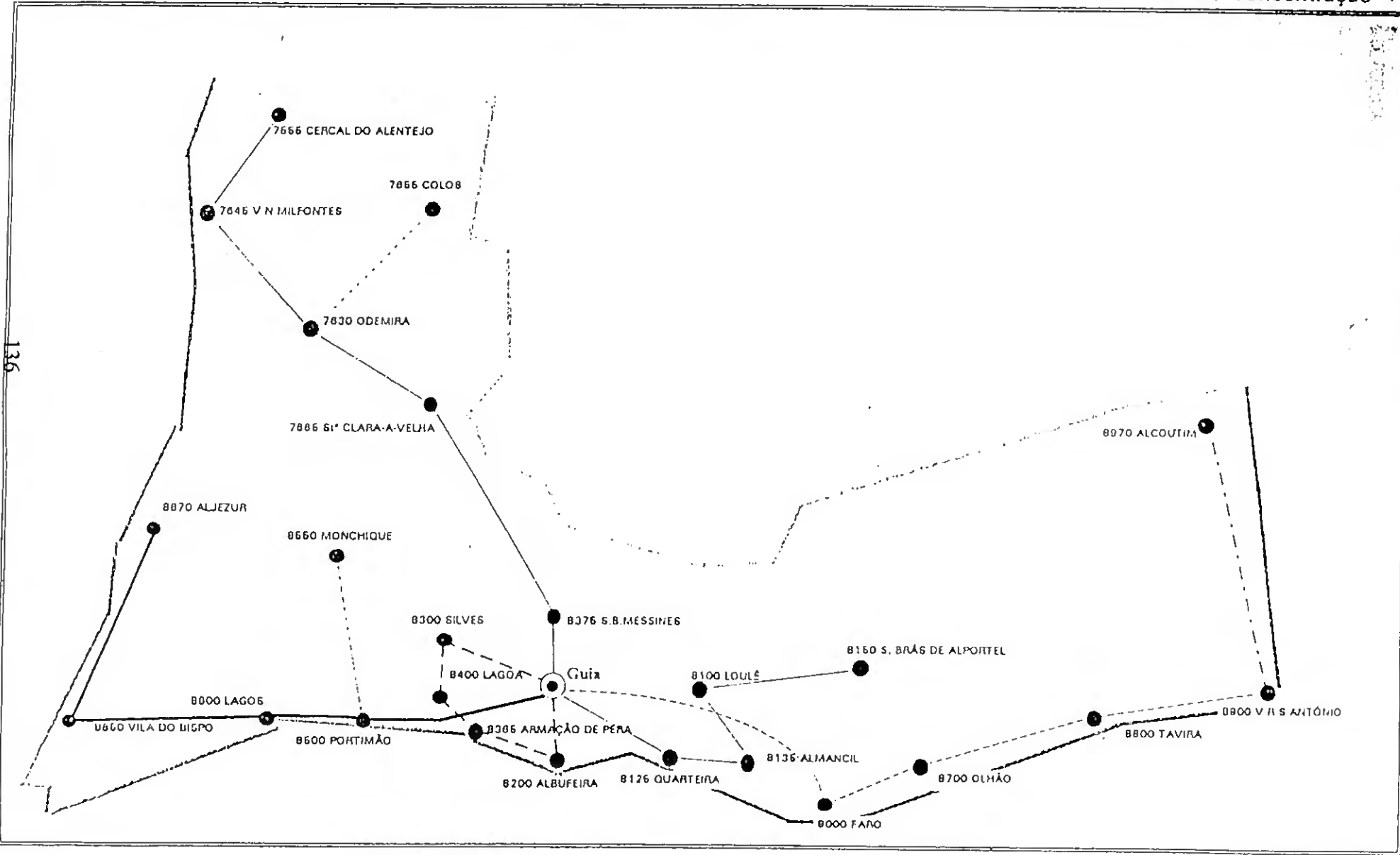
135



ANEXO ID

REGIÃO DE ENCAMINHAMENTOS DO SUL

Carreiras / Concentração

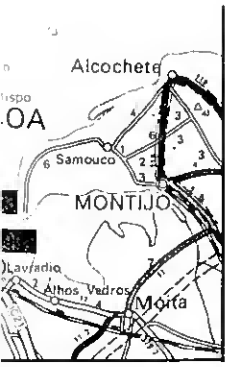


136

ANEXO 1D

ANEXO 2

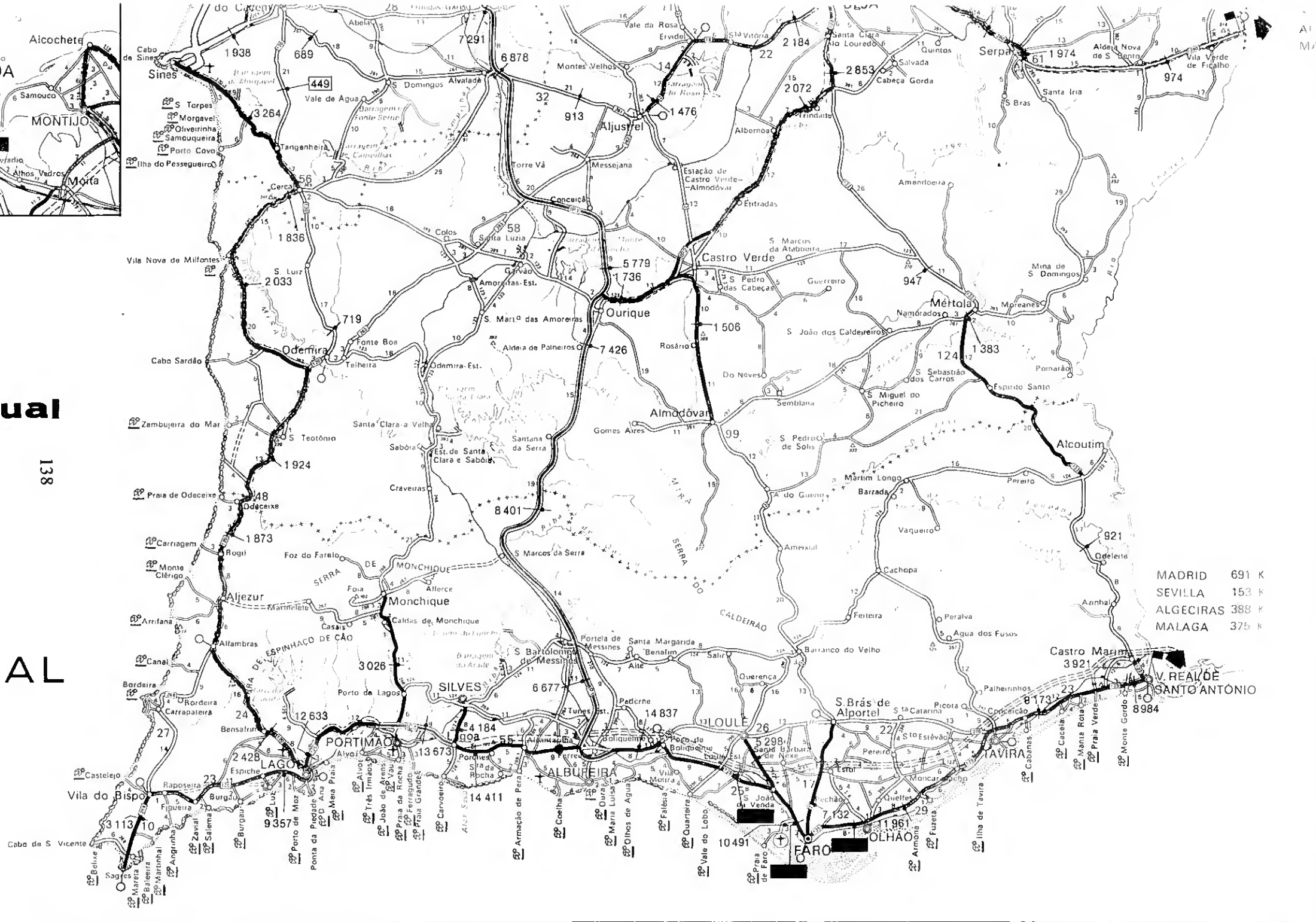
MAPA DA REGIÃO



anual

138

ALGAR



MADRID 691 K
SEVILLA 153 K
ALGECIRAS 388 K
MALAGA 375 K

Castro Marim 3921
V. REAL DE S. ANTONIO 8984

ANEXO 3

FICHEIROS

FICHEIROS DE ENTRADA

Em virtude da existência de dois tipos distintos de ficheiro de entrada - de acordo com os programas que os utilizam - referem-se, para cada um deles, os respectivos conteúdos (Quadro seguinte), em consonância com as correspondentes listagens apresentadas posteriormente.

FICHEIROS DE ENTRADA		
Nº LINHA	CHRISTOFIDES ET AL	FISHER E JAIKUMAR
1	Nº exemplos a executar	Nº exemplos a executar
2	Nº clientes (N); Nº viaturas (M), Capacidade de carga de cada viatura (Q)	Coordenadas do depósito (x_0, y_0); Nº clientes (N); Nº viaturas (M), Tipo de escolha de semente (S1 ou S2), Capacidade de carga de cada viatura (Q) Controlo de impressão, Controlo nº iterações, Idem
3	Vazio	
4 e 5	Procura dos clientes (q_i); $i=1, \dots, N$	Coordenadas X dos clientes
6		Coordenadas Y dos clientes
7	Vazio	
8 a 10	Distâncias entre os clientes e estes e o depósito. Os valores foram introduzidos através da leitura em linha da matriz apresentada na página 54	Procura dos clientes (q_i); $i=1, \dots, N$
11		Vazio
12 a 23		Distâncias entre os clientes e estes e o depósito. Os valores foram introduzidos através da leitura em linha da matriz apresentada na página 54
24	Vazio	
25 e 26	Tempos de paragem (CDP's de 1 a N)	Tempos de paragem (CDP's de 1 a N)
27	Vazio	
28	Tempos limite (janelas de tempo)	Vazio
29 e 30	(CDP's de 1 a N)	Tempos de paragem (CDP's de 1 a N)
31 a 33		Tempos limite (janelas de tempo) (CDP's de 1 a N)

FICHEIRO DE ENTRADA (TIPO) - PROGRAMA "CHRISTOFIDES ET AL"

1

23 5 15

4.894 0.156 0.457 1.358 1.932 0.505 10.473 2.228 4.096

5.267 0.785 2.946 4.709 10.481 2.713 1.040 0.242 0.855

1.649 4.138 0.259 2.739 1.032

6 98 75 27 8 142 39 15 45 28 51 115 47 24 25 41 84 15 22
63 138 86 68 102 86 25 12 148 37 21 51 27 57 121 45 30 19
40 90 25 28 62 144 85 74 168 82 111 220 87 108 138 75 129
193 79 117 89 71 162 83 100 58 216 44 161 102 70 69 114 60
30 103 76 42 122 51 100 116 73 85 68 138 65 161 33 37 169
12 42 72 7 78 142 20 51 7 20 111 42 49 41 165 64 95 138
47 10 40 36 47 111 55 19 31 49 80 23 18 76 134 99 63 181
125 99 170 91 27 189 116 167 183 58 137 120 205 15 228 102
54 84 17 90 154 8 63 19 17 123 54 61 29 177 52 107 30 43
34 98 62 9 40 56 67 25 8 83 121 106 53 73 46 72 92 21 70
86 79 55 38 113 95 136 23 79 143 25 52 11 13 112 37 50 35
166 58 96 64 98 25 76 92 33 46 29 114 87 137 69 162 89 140
156 31 110 93 178 23 201 75 71 27 22 131 62 69 21 185 44
115 49 65 58 34 17 87 112 110 44 24 109 40 47 48 163 71 93
125 50 63 22 179 45 109 79 62 147 54 170 102 17 72 133 95
78 85 116 108 61 201 23 131 224 98 154

900 600 1200 300 600 300 1200 600 1200 600 600 480 600 1200

600 900 180 180 600 600 300 600 600

22260 22860 26640 23340 22020 25140 23820 25260 24060 25380 24120

25740 23700 23160 24720 25440 29100 24660 26340 23640 27120 26760

22260

FICHEIRO DE ENTRADA (TIPO) - PROGRAMA "FISHER E JAIKUMAR"

1

0 0 23 5 1 23 0 100 10

7 120.5 -73 39 -9 -54 54 -23 -55.5 41 -37.5 -49

67 -35 29 60 -25 2 -20.5 96 -69.5 129 -90

-7.5 63 34.5 -7 -5 123.5 -21 1 -4.5 2.5 35 87

-19 2 -11 4.5 71 23.5 11 0 109.5 12.5 -8

4.894 0.156 0.457 1.358 1.932 0.505 10.473 2.228 4.096

5.267 0.785 2.946 4.709 10.481 2.713 1.040 0.242 0.855

1.649 4.138 0.259 2.739 1.032

6 98 75 27 8 142 39 15 45 28 51 115 47 24 25 41 84 15 22

63 138 86 68 102 86 25 12 148 37 21 51 27 57 121 45 30 19

40 90 25 28 62 144 85 74 168 82 111 220 87 108 138 75 129

193 79 117 89 71 162 83 100 58 216 44 161 102 70 69 114 60

30 103 76 42 122 51 100 116 73 85 68 138 65 161 33 37 169

12 42 72 7 78 142 20 51 7 20 111 42 49 41 165 64 95 138 47

10 40 36 47 111 55 19 31 49 80 23 18 76 134 99 63 181 125

99 170 91 27 189 116 167 183 58 137 120 205 15 228 102 54

84 17 90 154 8 63 19 17 123 54 61 29 177 52 107 30 43 34

98 62 9 40 56 67 25 8 83 121 106 53 73 46 72 92 21 70 86

79 55 38 113 95 136 23 79 143 25 52 11 13 112 37 50 35 166

58 96 64 98 25 76 92 33 46 29 114 87 137 69 162 89 140 156

31 110 93 178 23 201 75 71 27 22 131 62 69 21 185 44 115

49 65 58 34 17 87 112 110 44 24 109 40 47 48 163 71 93 125

50 63 22 179 45 109 79 62 147 54 170 102 17 72 133 95 78

85 116 108 61 201 23 131 224 98 154

900 600 1200 300 600 300 1200 600 1200 600 600 480 600

1200 600 900 180 180 600 600 300 600 600

22260 22860 26640 23340 22020 25140 23820 25260 24060 25380

24120 25740 23700 23160 24720 25440 29100 24660 26340 23640

27120 26760 22260

FICHEIRO DE SAÍDA (TIPO) - PROGRAMA "CHRISTOFIDES ET AL"

CAPACIDADE DE CADA VEICULO = 23.00

TOTAL DAS PROCURAS = 64.95

PROC.TOT./CAPAC. 0.56

AFECTACOES DOS CLIENTES AOS VEICULOS

NUM. ROTA SEM CLIENTES

1 6 0 14 11 17 6 21 3 5 0

PESO DA ROTA 14.66

CUSTO DA ROTA 298.00

NUM. ROTA SEM CLIENTES

2 2 0 23 18 2 16 13 4 1 0

PESO DA ROTA 14.04

CUSTO DA ROTA 373.00

NUM. ROTA SEM CLIENTES

3 12 0 15 19 12 9 8 0

PESO DA ROTA 13.63

CUSTO DA ROTA 282.00

NUM. ROTA SEM CLIENTES

4 22 0 22 20 10 0

PESO DA ROTA 12.14

CUSTO DA ROTA 172.00

NUM. ROTA SEM CLIENTES

5 7 0 7 0

PESO DA ROTA 10.47
 CUSTO DA ROTA 78.00
 CUSTO TOTAL 1203.00

CDP onde não é cumprida a hora limite:

6 21 3 5 23 18 2 16 13 4 1 12 9 8 20 10

Nº CDP: 16

SOLUÇÃO FINAL:

0 5 14 11 17 6 21 12	PESO DA ROTA 1 = 17.15
0 8 9 3 23	PESO DA ROTA 2 = 7.81
0 1 15 18 19	PESO DA ROTA 3 = 10.11
0 13 20 22 2	PESO DA ROTA 4 = 11.74
0 4 7 16 10	PESO DA ROTA 5 = 18.14

Todos CDP servidos e cumprindo tempos ==> SOLUÇÃO ADMISSIVEL

CUSTO TOTAL DA SOLUÇÃO FINAL: 906

TEMPO DE TSP: 0.16 SEGUNDOS

TEMPO DE AFECTAÇÃO: 0.05 SEGUNDOS

AFECTACOES DOS CLIENTES AOS VEICULOS

NUM. ROTA SEM CLIENTES

1 6 0 5 8 9 23 21 6 18 0

PESO DA ROTA 10.91
 CUSTO DA ROTA 336.00

NUM. ROTA SEM CLIENTES

2 2 0 19 11 17 2 20 13 16 0

PESO DA ROTA 12.72
 CUSTO DA ROTA 388.00

NUM. ROTA SEM CLIENTES

3 12 0 14 12 3 0

PESO DA ROTA 13.88

CUSTO DA ROTA 230.00

NUM. ROTA SEM CLIENTES

4 22 0 10 22 4 15 0

PESO DA ROTA 12.08

CUSTO DA ROTA 182.00

NUM. ROTA SEM CLIENTES

5 7 0 7 1 0

PESO DA ROTA 15.37

CUSTO DA ROTA 82.00

CUSTO TOTAL 1218.00

CDP onde não é cumprida a hora limite:

23 21 6 18 2 20 13 16 12 3 4 15

Nº CDP: 12

SOLUÇÃO FINAL:

0 5 8 9 3 23	PESO DA ROTA 1 = 9.75
0 18 19 11 17 6 21 12	PESO DA ROTA 2 = 7.24
0 14	PESO DA ROTA 3 = 10.48
0 15 4 10 22 2	PESO DA ROTA 4 = 12.23
0 1 7 16	PESO DA ROTA 5 = 16.41

Há 2 CDP não servidos ==> SOL. NÃO ADMISSIVEL

CUSTO TOTAL DA SOLUÇÃO FINAL: 872

TEMPO DE TSP: 0.16 SEGUNDOS

TEMPO TOTAL: 1.48 SEGUNDOS

FICHEIRO DE SAÍDA (TIPO) - PROGRAMA "FISHER E JAİKUMAR"

CAPACIDADE DE CADA VEICULO = 23.00

TOTAL DAS PROCURAS = 64.95

PROC.TOT./CAPAC. 0.56

TEMPO DE DETERMINAÇÃO DAS SEMENTES: 0.05 SEGUNDOS

TEMPO DE AFECTAÇÃO: 6.37 SEGUNDOS

AFECTACOES DOS CLIENTES AOS VEICULOS

NUM. ROTA SEM CLIENTES

1 10 0 2 16 10 4 15 0

PESO DA ROTA 10.53

CUSTO DA ROTA 221.00

NUM. ROTA SEM CLIENTES

2 12 0 18 19 11 17 12 21 6 3 23 9 8 0

PESO DA ROTA 15.05

CUSTO DA ROTA 333.00

NUM. ROTA SEM CLIENTES

3 14 0 14 5 0

PESO DA ROTA 12.41

CUSTO DA ROTA 51.00

NUM. ROTA SEM CLIENTES

4 1 0 1 0

PESO DA ROTA 4.89

CUSTO DA ROTA 12.00

NUM. ROTA SEM CLIENTES

5 7 0 20 22 13 7 0

PESO DA ROTA 22.06

CUSTO DA ROTA 177.00

CUSTO TOTAL 794.00

CDP onde não é cumprida a hora limite:

2 16 10 4 15 12 21 6 3 23 9 8 5 13 7

Nº CDP: 15

ROTREST = 0 0 18 19 11 17 0 14 0 1 0 20 22

SOLUÇÃO FINAL:

0 16 10 15

PESO DA ROTA 1 = 9.02

0 18 19 11 17 6 21 12

PESO DA ROTA 2 = 7.24

0 5 8 14 9 23

PESO DA ROTA 3 = 19.77

0 1 13 7

PESO DA ROTA 4 = 20.08

0 4 20 22 2

PESO DA ROTA 5 = 8.39

Há 1 CDP não servido ==> SOL. NÃO ADMISSIVEL

CUSTO TOTAL DA SOLUÇÃO FINAL: 865

TEMPO DE TSP: 0.72 SEGUNDOS

TEMPO TOTAL: 7.25 SEGUNDOS

ANEXO 4

PROCEDIMENTOS E LISTAGENS

PROCEDIMENTOS

Apresenta-se, seguidamente e pela ordem indicada, uma descrição sumária dos procedimentos de pós-optimização temporal implementados e as respectivas listagens.

O procedimento designado por INTRAROTA no capítulo 4 é constituído pelo conjunto TEMP + INTRAT, enquanto o grupo ORDTEMP + ROTRUNC + INSFALHA + TEMPI + DISTANCIA corresponde ao procedimento INTERROTA.

DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS

ALTDEADT

Efectua a alteração das horas limite de chegada a cada CDP sempre que o tempo de trajecto entre o depósito central e o CDP, adicionado à hora de início da rota, seja superior ao limite pré-estabelecido.

TEMP e TEMPI

Calculam as horas de chegada a cada CDP para todos os clientes de todas as rotas, tendo em conta os tempos de trajecto e os tempos de paragem.

INTRAT

Efectua trocas de posição entre um cliente que não cumpre a respectiva "janela de tempo" e os clientes que o antecedem (dentro da mesma rota), se essa alteração produzir o cumprimento das restrições temporais em todos os clientes envolvidos.

ORDTEMP

Ordena os CDP's, nos quais não são cumpridas as "janelas de tempo", por ordem crescente das horas limite de chegada.

ROTRUNC

Liberta das rotas da solução corrente os CDP's que não cumprem as restrições temporais.

INSFALHA

Insera os clientes (não servidos) nas rotas e posições que minimizam os custos, se as restrições de capacidade e temporais forem cumpridas.

DISTANCIA

Calcula a distância percorrida pelo veículo que executa a rota, para cada uma das alternativas de inserção admissíveis dos clientes não servidos e retem a solução de menor custo.

LISTAGENS

A partir do vector **ROUTE[Var]** que contem a solução final do PORV sem Restrições Temporais (obtido pelos programas originais), procedeu-se do seguinte modo:

```

      .
      .
ROTAT[CONTAD]:=ROUTE[K2];
      .
      .
CONTAD:=0;
FOR C1:=1 TO N+M DO BEGIN
  IF ROTAT[C1]=0 THEN BEGIN
    CONTAD:=CONTAD+1;
    POS[CONTAD]:=C1;
                                END;
  IF C1=N+M THEN BEGIN
    CONTAD:=CONTAD+1;
    POS[CONTAD]:=C1;
                                END;
                                END;
FOR JT1:=1 TO CONTAD-1 DO BEGIN
  IF JT1 < CONTAD-1 THEN BEGIN
    FOR C1:=POS[JT1] TO POS[JT1+1]-1 DO BEGIN
      TEMP;
      INTRAT;
                                END;
    FOR C1:=POS[JT1] TO POS[JT1+1]-1 DO
      END
    ELSE BEGIN
      FOR C1:=POS[JT1] TO N+M DO BEGIN
        TEMP;
        INTRAT;
        END;
        FOR C1:=POS[JT1] TO N+M DO
          END;
      END;
END;

```

```

        WRITELN (SAI);
        FOR C1:=1 TO N+M DO BEGIN
            TEMP;
                                END;
WRITELN (SAI);
FOR C1:=1 TO N+M DO BEGIN
    IF ROTAT[C1] < > 0 THEN BEGIN
        IF TEMPO[C1] > DEADT[ROTAT[C1]] THEN BEGIN
            CDP[FALHA]:=ROTAT[C1];
            FALHA:=FALHA+1;
                                END;
        IF DEADT[ROTAT[C1]]=86400 THEN BEGIN
            CDP[FALHA]:=ROTAT[C1];
            FALHA:=FALHA+1;
                                END;
            END;
        END;
    IF FALHA=1 THEN
        WRITELN (SAI,' Os tempos são cumpridos em todos os cdp')
    ELSE BEGIN
        WRITELN (SAI);
        WRITELN (SAI,' CDP onde não é cumprida a hora limite: ');
        FOR C1:=1 TO FALHA-1 DO WRITE (SAI,' ', CDP[C1]);
        WRITELN (SAI);
        WRITELN (SAI,' N° CDP: ',FALHA-1);
        ORDTEMP;
        ROTRUNC;
        INSFALHA;
        END;
END;

```

PROCEDURE ALTDEADT;

```

BEGIN
  FOR R:=1 TO N DO BEGIN
    TOT:=DISTR[R]*72+18000;
    IF TOT>DEADT[R] THEN DEADT[R]:=86400;
      END;
  END;
END;

```

PROCEDURE TEMP;

```

BEGIN
  IF ROTAT [C1]=0 THEN BEGIN
    TEMPO[C1]:= HORINI;
    JT:=C1;
    END;
  IF C1 = JT+1 THEN
    TEMPO[C1]:=TEMPO[C1-1]+VEL*DISTR[ROTAT[C1]];
  IF C1>JT+1 THEN BEGIN
    D:=ROTAT[C1-1];
    D1:=ROTAT[C1];
    IF D>D1 THEN D2:=DISTR[INDR[D1]+D-D1-1];
    IF D<D1 THEN D2:=DISTR[INDR[D]+D1-D-1];
    IF D=D1 THEN D2:=0;
    TEMPO[C1]:=TEMPO[C1-1]+D2*VEL+TPARAG[ROTAT[C1-1]];
      END;
  END;
END;

```

PROCEDURE INTRAT;

```

VAR A1,B1,RAUX1,RAUX2 : INTEGER;
    RAUX3,RAUX4 : REAL;

BEGIN
  IF ROTAT[C1] < > 0 THEN BEGIN
    IF TEMPO[C1] > DEADT[ROTAT[C1]] THEN BEGIN
      A1:=C1;
      B1:=1;
      REPEAT
        RAUX1:= ROTAT[A1];
        RAUX2:= ROTAT[A1-B1];
        ROTAT[A1]:= RAUX2;
        ROTAT[A1-B1]:= RAUX1;
        C1:=POS[JT1]+1;
        REPEAT
          TEMP;
          IF ROTAT[C1] < > 0 THEN BEGIN
            IF TEMPO[C1] > DEADT[ROTAT[C1]] THEN BEGIN
              ROTAT[A1]:=RAUX1;
              ROTAT[A1-B1]:=RAUX2;
              C1:=A1;
              B1:=B1+1;
            END
          ELSE BEGIN
            IF C1=A1 THEN BEGIN
              B1:= A1-POS[JT1]-1;
              C1:= A1;
            END;
          END;
        END;
      UNTIL C1=A1+1;
    UNTIL B1=A1-POS[JT1]-1;
    C1:=A1;
  END;

```

```

END;
END;

```

PROCEDURE ORDTEMP;

```

VAR A1,B1,RAUX3,RAUX4 : INTEGER;
    RAUX1, RAUX2: REAL;

BEGIN

WRITELN (SAI);
FOR B1:= 1 TO FALHA-1 DO BEGIN
    TL[B1]:= DEADT[CDP[B1]];
        END;
FOR B1:=1 TO FALHA-2 DO BEGIN
    A1:=1;
    REPEAT
        IF TL[B1]>TL[B1+A1] THEN BEGIN
            RAUX1:= TL[B1];
            RAUX2:= TL[B1+A1];
            RAUX3:= CDP[B1];
            RAUX4:= CDP[B1+A1];
            TL[B1]:= RAUX2;
            TL[B1+A1]:= RAUX1;
            CDP[B1]:=RAUX4;
            CDP[B1+A1]:=RAUX3;
            A1:=A1+1;
                END
        ELSE
            A1:=A1+1;
    UNTIL A1=FALHA-B1;
END;
WRITELN (SAI);
FOR B1:= 1 TO FALHA-1 DO BEGIN
WRITE (SAI, ' ',CDP[B1], ': ',TL[B1]:5:0);

```

```

    END;
END;

```

PROCEDURE ROTRUNC;

```

    VAR A1,B1,T : INTEGER;

BEGIN
    B1:=0;
    FOR T:=1 TO N+M DO BEGIN
        CONTAD:=0;
        FOR A1:=1 TO FALHA-1 DO BEGIN
            IF ROTAT[T]=CDP[A1] THEN
                CONTAD:=CONTAD+1;
            END;
        IF CONTAD=0 THEN BEGIN
            B1:=B1+1;
            ROTREST[B1]:=ROTAT[T];
            END;
        END;
    END;

    WRITELN (SAI);
    WRITE (SAI, 'ROTREST= ');
    FOR B1:=1 TO N+M-(FALHA-1) DO WRITE (SAI, ' ',ROTREST[B1]);
END;

```

PROCEDURE INSFALHA;

```

VAR A1,B1,T,E,CONT,ITER : INTEGER;
    DMAX : REAL;
    RAUX2,RAUX3 : ARR3;

BEGIN

R:=0;
ITER:=N+M-(FALHA-1);
FOR B1:=1 TO FALHA-1 DO BEGIN
    CONT:=0;
    FOR T:=1 TO ITER DO BEGIN
        IF ROTREST[T]=0 THEN BEGIN
            CONT:=CONT+1;
            POS[CONT]:=T;
                END;
            END;

        CONT:=0;
        DMAX:=5000;
        FOR T:=1 TO M DO BEGIN
            IF T <> M THEN BEGIN
                FOR A1:=POS[T]+1 TO POS[T+1] DO BEGIN
                    FOR R:= POS[T] TO POS[T+1] DO BEGIN
                        IF R < A1 THEN RAUX[R]:=ROTREST[R];
                        IF R > A1 THEN RAUX[R]:=ROTREST[R-1];
                        IF R=A1 THEN RAUX[R]:=CDP[B1];
                            END;
                        END;

                    R:=1;
                    FOR E:=POS[T] TO POS[T+1] DO BEGIN
                        TEMP1;
                        IF RAUX[E] <> 0 THEN BEGIN
                            IF TEMPO[E]>DEADT[RAUX[E]] THEN R:=0;
                                END;
                            END;
                                END;

                    IF R=1 THEN BEGIN
                        FOR R:=1 TO POS[T] DO RAUX2[R]:=ROTREST[R];

```

```

FOR R:=POS[T] TO POS[T+1] DO RAUX2[R]:=RAUX[R];
FOR R:=POS[T+1]+1 TO ITER+1 DO RAUX2[R]:=ROTREST[R-1];
  CONT:=1;
  DISTANCIA;
  D:=0;
  FOR R:=1 TO ITER+1 DO BEGIN
    IF ROTREST[R]=0 THEN BEGIN
      D:=D+1;
      POS[D]:=R;
      END;
      END;
    END;
  END;
END;
END;
IF T=M THEN BEGIN
FOR A1:=POS[T]+1 TO ITER+1 DO BEGIN
FOR R:= POS[T] TO ITER+1 DO BEGIN
  IF R<A1 THEN RAUX[R]:=ROTREST[R];
  IF R>A1 THEN RAUX[R]:=ROTREST[R-1];
  IF R=A1 THEN RAUX[R]:=CDP[B1];
  END;
R:=1;
FOR E:=POS[T] TO ITER+1 DO BEGIN
TEMP1;
  IF RAUX[E]<>0 THEN BEGIN
    IF TEMPO[E]>DEADT[RAUX[E]] THEN R:=0;
    END;
  END;
END;
IF R=1 THEN BEGIN
  FOR R:=1 TO POS[T] DO RAUX2[R]:=ROTREST[R];
  FOR R:=POS[T]+1 TO ITER+1 DO RAUX2[R]:=RAUX[R];
  CONT:=1;
  DISTANCIA;
  D:=0;
  FOR R:=1 TO ITER+1 DO BEGIN
    IF ROTREST[R]=0 THEN BEGIN
      D:=D+1;

```

```

        POS[D]:=R;
                                END;
                                END;
        END;
    END;
    END;
    END;
    IF CONT=1 THEN BEGIN
        FOR R:=1 TO ITER+1 DO BEGIN
            ROTREST[R]:=RAUX3[R];
                                END;
                                END;
        ITER:=ITER+CONT;
    END;
    WRITELN (SAI);
    WRITE (SAI,'          SOLUÇÃO :');
    TOT:=0;
    D:=0;
    FOR R:=1 TO ITER DO BEGIN
        IF ROTREST[R]=0 THEN BEGIN
            D:=D+1;
            POS[D]:=R;
                                END;
                                END;
    FOR T:=1 TO M DO BEGIN
        IF T<>M THEN BEGIN
            FOR R:=POS[T] TO POS[T+1]-1 DO BEGIN
                IF ROTREST[R]=0 THEN BEGIN
                    WRITELN (SAI);
                    WRITE (SAI,' ',ROTREST[R]);
                                END
                ELSE BEGIN
                    WRITE (SAI,' ',ROTREST[R]);
                    TOT:=TOT+A[ROTREST[R]]
                    END;
                                END;
            WRITE (SAI,' PESO DA ROTA ',T,' = ',TOT:2:2);

```

```

        IF TOT > B THEN BEGIN
WRITELN (SAI);
WRITE (SAI, 'PESO DA ROTA MAIOR QUE CAPACIDADE DO VEICULO ');
WRITE (SAI, ' == > SOL. NÃO ADMISSIVEL');
        END;
        TOT:=0;
        END;
    IF T=M THEN BEGIN
        FOR R:=POS[T] TO ITER DO BEGIN
            IF ROTREST[R]=0 THEN BEGIN
                WRITELN (SAI);
                WRITE (SAI, ' ', ROTREST[R]);
                END
            ELSE BEGIN
                WRITE (SAI, ' ', ROTREST[R]);
                TOT:=TOT+A[ROTREST[R]]
                END;
            END;
        END;
        WRITE (SAI, ' PESO DA ROTA ', T, ' = ', TOT:2:2);
        IF TOT > B THEN BEGIN
WRITELN (SAI);
WRITE (SAI, 'PESO DA ROTA MAIOR QUE CAPACIDADE DO VEICULO ');
WRITE (SAI, ' == > SOL.NAO ADMISSIVEL');
        END;
        TOT:=0;
        END;
        END;
    IF ITER < N+M THEN BEGIN
WRITELN (SAI);
WRITELN (SAI, ' H ', N+M-ITER, ' CDP nao servidos == > SOL.NAO ADMISSIVEL');
        END
    ELSE BEGIN
WRITELN (SAI);
WRITE (SAI, ' Todos CDP servidos e cumprindo tempos');
WRITE (SAI, ' == > SOLUÇÃO ADMISSIVEL');
        END;
WRITELN (SAI);

```

```

WRITELN (SAI,'CUSTO TOTAL DA SOLUÇÃO FINAL: ',DMAX:5:0);
END;

```

PROCEDURE TEMPI;

```

BEGIN
  IF RAUX[E]=0 THEN BEGIN
    TEMPO[E]:= HORINI;
    JT:=E;
  END;
  IF E = JT+1 THEN
    TEMPO[E]:=TEMPO[E-1]+VEL*DISTR[RAUX[E]];
  IF E>JT+1 THEN BEGIN
    D:=RAUX[E-1];
    D1:=RAUX[E];
    IF D>D1 THEN D2:=DISTR[INDR[D1]+D-D1-1];
    IF D<D1 THEN D2:=DISTR[INDR[D]+D1-D-1];
    IF D=D1 THEN D2:=0;
    TEMPO[E]:=TEMPO[E-1]+D2*VEL+TPARAG[RAUX[E-1]];
  END;
END;

```

PROCEDURE DISTANCIA;

```

VAR J : INTEGER;
    D3: REAL;

BEGIN
  D:=0;
  FOR R:=1 TO ITER+1 DO BEGIN
    IF RAUX2[R]=0 THEN BEGIN
      D:=D+1;
      POS[D]:=R;
    END;
  END;

```

```

                                END;
D3:=0;
FOR J:=1 TO M DO BEGIN
  IF J<>M THEN BEGIN
    D3:=D3+DISTR[RAUX2[POS[J]+1]]+DISTR[RAUX2[POS[J+1]-1]];
    IF POS[J+1]-POS[J]>2 THEN BEGIN
      FOR R:=POS[J]+1 TO POS[J+1]-2 DO BEGIN
        D:=RAUX2[R];
        D1:=RAUX2[R+1];
        IF D<D1 THEN D2:=DISTR[INDR[D]+D1-D-1];
        IF D>D1 THEN D2:=DISTR[INDR[D1]+D-D1-1];
        IF D=D1 THEN D2:=0;
        D3:=D3+D2;
                                END;
                        END;
                END;
  IF J=M THEN BEGIN
    D3:=D3+DISTR[RAUX2[POS[J]+1]]+DISTR[RAUX2[ITER+1]];
    IF ITER+1-POS[J]>1 THEN BEGIN
      FOR R:=POS[J]+1 TO ITER DO BEGIN
        D:=RAUX2[R];
        D1:=RAUX2[R+1];
        IF D<D1 THEN D2:=DISTR[INDR[D]+D1-D-1];
        IF D>D1 THEN D2:=DISTR[INDR[D1]+D-D1-1];
        IF D=D1 THEN D2:=0;
        D3:=D3+D2;
                                END;
                        END;
                END;
    END;
    END;
  IF D3<DMAX THEN BEGIN
    DMAX:=D3;
    FOR R:=1 TO ITER+1 DO BEGIN
      RAUX3[R]:=RAUX2[R];
                                END;
      END;
    END;
  END;
END;

```

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, M. T. (1988), "Problema Básico de Distribuição e suas Extensões - Uma Revisão Bibliográfica", Doc. Trab. N° 46, CEMAPRE, ISE, Univ. Tec. Lisboa

ALVES, M. L. e M. T. ALMEIDA (1992), "Simulated Annealing Algorithm for the Simple Plant Location Problem: A Computational Study", Invest. Op., 12, N° 2, pp. 145-157

BALAKRISHNAN, N. (1993), "Simple Heuristics for the Vehicle Routing Problem With Soft Time Windows", JORS (U.K.) 44, pp. 279-287

BELTRAMI, E. J. and L. BODIN (1974), "Networks and Vehicle Routing for Municipal Waste Collection", Networks, 4, pp. 65-94

BODIN, L. and L. BERMAN (1979), "Routing and Scheduling of School Buses by Computer", Transp. Science, Vol. 13, N° 2, pp. 113-129

BODIN, L. (1990), "Twenty Years of Routing and Scheduling", Ops. Research, 38, pp. 571-579

CHRISTOFIDES, N. and S. EILON (1969), "An Algorithm for Vehicle Dispatching Problem", Operational Research Q., 20, pp. 309-318

CHRISTOFIDES, N.; A. MINGOZZI and P. TOTH (1979), "The Vehicle Routing Problem" in Combinatorial Optimization, Christofides, Mingozzi, Toth and Sandi (eds), John Wiley

CHRISTOFIDES, N. (1979), "The Travelling Salesman Problem" in Combinatorial Optimization, Christofides; Mingozzi; Toth and Sandi, (eds), John Wiley

CHRISTOFIDES, N.; A. MINGOZZI and P. TOTH (1981a), "Exact Algorithms for the Vehicle Routing Algorithm Based on Spanning Tree and Shortest Path Relaxations", Math. Prog., 20, pp. 255-282

CHRISTOFIDES, N.; A. MINGOZZI and P. TOTH (1981b), "State-Space Relaxation Procedures for the Computation of Bounds to Routing Problems", Networks, 11, pp. 145-164

CHRISTOFIDES, N. (1985), "The Vehicle Routing Problem" in the Travelling Salesman Problem: a Guide Tour of Combinatorial Optimization, Lawler E., J. Lenstra, A. Rinnooy Kan and D. Shmoys (eds.), John Wiley

CLARKE, G. and J. WRIGHT (1964), "Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points", Ops. Research, 12, pp. 568-581

DELL'AMICO, M.; M. FISCHETTI and P. TOTH (1993), "Heuristic Algorithms for the Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem", Manag. Science, 39, N° 1, pp. 115-125

DERIGS, U. and A. METZ (1992), "A Matching Based Approach for Solving a Delivery/Pickup Vehicle Routing Problem With Time Constrains", OR Spektrum (Alemanha) 14, pp. 91-106

DESROCHERS, M. and T. W. VERHOOG (1991), "A New Heuristic for the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem ", Computers & Op. Res. (UK) 18, pp. 263-274

DESROCHERS, M.; J. DESROSIERS and M. SOLOMON (1992), "A New Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem With Time Windows", *Op. Res. (US)* 40, pp. 342-354

DESROSIERS, J.; M. SAUVÉ and F. SOUMIS (1988), "Lagrangian Relaxation Methods for Solving the Minimum Fleet Size Multiple Traveling Salesman Problem With Time Windows", *Manag. Science*, Vol. 34, N° 8, pp. 1005-1022

DUMAS, Y.; J. DESROSIERS and F. SOUMIS (1991), "The Pickup and Delivery Problem With Time Windows", *EJOR (Holanda)* 54, pp. 7-22

EUSÉBIO, J. e L. AMADO (1987), "Modelos de Planeamento/Gestão para Optimização das Necessidades de Viaturas e Tripulações numa Rede de Transportes", *Invest. Op.*, 7, N° 1, pp. 81-89

EVANS, S. and J. NORBACK (1985), "The Impact of a Decision-Support System for Vehicle Routing in a Foodservice Supply Situation", *J. Opl. Res. Soc.*, Vol. 36, N° 6, pp. 467-472

FERLAND, J. A. and P. MICHELON (1988), "The vehicle scheduling problem with multiple vehicle types", *JORS (UK)* 39, pp. 577-583

FIECHTER, C. N.; A. ROGGER and D. DE WERRA (1992), "Basic Ideas of Tabu Search with an Application to Traveling Salesman and Quadratic Assignment", *Ricerca Operativa (Italia)* 62 (Summer), pp. 5-28

FISHER, M. and R. JAIKUMAR (1981), "A Generalized Assignment Heuristic for Vehicle Routing", *Networks*, 11, pp. 109-124

FOISY, C. and J. POTVIN (1993), "Implementing an Insertion Heuristic for Vehicle Routing on Parallel Hardware", *Computers & Op. Res. (U.K.)* 20, pp. 737-745

GHEYSENS, F.; B. GOLDEN and A. ASSAD (1986), "A New Heuristic for Determining Fleet Size and Composition", Math. Prog. Study, 26, pp. 233-236

GILLET, B. and L. MILLER (1974), "A Heuristic Algorithm for The Vehicle-Dispatch Problem", Ops. Research, 22, pp. 340-349

GOLDBERG, D. (1989), Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addison-Wesley (Eds.)

GOLDEN, B.; T. MAGNANTI and H. NGUYEN (1977), "Implementing Vehicle Routing Algorithms", Networks, 7, pp. 113-148

GOLDEN, B. and A. ASSAD (1986), "Perspectives on Vehicle Routing: Exciting New Developments", Ops. Research, 34, N° 5, pp. 803-810

GOLDEN, B. and E. WASIL (1987), "Computerized Vehicle Routing in the Soft Drink Industry", Ops. Research, 35, N° 1, pp. 6-17

GRAHAM, D. and H. NUTTLE (1986), "A Comparison of Heuristics for a School Bus Scheduling Problem", Transp. Res. B, 20, N° 2, pp. 175-182

HAOUARI, M.; P. DEJAX and M. DESROCHERS (1990) "Les Problemes de Tournées avec Contraintes de Fenetre de Temps: L'État de L'Art", Recherche Operationnelle (França) 24, pp. 217-244

KOLEN, A.; A. RINNOOY KAN and H. TRIENEKENS (1987), "Vehicle Routing with Time Windows", Ops. Research, 35, N° 2, pp. 266-273

LAMBERT, V.; G. LAPORTE and LOUVEAUX (1993), "Designing Collection Routes through Bank Branches", Computers & Op. Res. (U.K.) 20, pp. 783-791

LAPORTE, G. and Y. NORBERT (1987), "Exact Algorithms for the Vehicle Routing Problem", *Annals of Disc. Math*, 31, pp. 147-184

LENSTRA, J. and A. RINNOOY KAN (1981), "Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems", *Networks*, 11, pp. 221-227

LIN, S. and B. KERNIGHAN (1973), "An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem", *Ops. Research*, 21, pp. 498-516

LIN, C. Y. and HAJELA (1992), "Genetic Algorithms in Optimization Problems with Discrete and Integer Design Variables", *P. Engineering Optimization (UK)* 19, pp. 309-327

LOKKETANGEN, A.; K. JÖRNSTEN and S. STOROY (1994), "Tabu Search Within a Pivot and Complement Framework", *Int. Trans. Opl. Res.*, 1, n° 3, pp. 305-316

NAG, B.; B. GOLDEN and A. ASSAD (1988), "Vehicle Routing With Site Dependencies" in *Vehicle Routing: Methods and Studies*, B. Golden and A. Assad (Eds.), North-Holland, pp. 149-159

NYGARD, K.; P. GREENBERG; W. BOLKAN and E. SWENSON (1988), "Generalized Assignment Methods for the Deadline Vehicle Routing Problem" in *Vehicle Routing: Methods and Studies*, B. Golden and A. Assad (eds), North-Holland

OSMAN, I. (1993), "Metastrategy Simulated Annealing and Tabu Search Algorithms for the Vehicle Routing Problem", *Annals of Ops. Res.*, 41, pp. 421-451

OSMAN, I. and N. CHRISTOFIDES (1994), "Capacited Clustering Problems by Hybrid Simulated Annealing and Tabu Search", *Int. Trans. Opl. Res.*, 1, N° 3, pp. 317-336

REGO, C. (1994), "Uma Heurística Tabu para a Determinação de Rotas de Veículos", *Invest. Op.*, 14, pp. 207-232

RONEN, D. (1987), "Perspectives on Practical Aspects of Truck Routing and Scheduling", School of Business Administration, Univ. of Missouri, St. Louis

ROSA, A. e A. M. PORTA NOVA (1993), "Localização de um Centro de Tratamento de Correio", *Invest. Op.*, 13, N° 1, pp. 31-49

SCHÜTZ, M. G. (1989), "Problema de Optimização de Rotas de Veículos - Um Estudo Computacional da Heurística de Fisher e Jaikumar", *Dissertação de Mestrado*, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

SCHÜTZ, M. G. (1990), "Problema de Optimização de Rotas de Veículos. Heurísticas de Duas Fases", *Doc. Trab. N° 4*, CEMAPRE, ISEG, Univ. Tec. Lisboa

SEMET, F. and E. TAILLARD (1993), "Solving Real-Life Vehicle Routing Problems Efficiently Using Tabu Search", *Annals of Ops. Res.*, 41, pp. 469-488

SOLOMON, M. (1987), "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Windows Constraints", *Ops. Research*, 35, N° 2, pp. 254-265

SOLOMON, M. and J. DESROSIERS (1988), "Time Windows Constrained Routing and Scheduling Problems", *Transp. Science*, Vol. 22, N° 1, pp. 1-13

ULDER, N.; E. AARTS; H. BANDELT; P. LAARHOVEN and E. PESCH (1991),
"Genetic Local Search Algorithms for the Traveling Salesman Problem", Lecture
Notes in Computer Science, 496, pp. 109-116

