



INSTITUTO POLITÉCNICO DE COIMBRA
Instituto Superior de Contabilidade e administração de Coimbra

Plano de trabalho da parte não lectiva
RELATÓRIO DE ESTÁGIO

OPTIMIZAÇÃO DE ROTAS NA RECOLHA DE LEITE

Óscar Rodrigues de Oliveira Pereira

Aluno nº 7518

*Relatório de Estágio realizado no Mestrado em Sistemas de Informação para Gestão
com a orientação de:*

Orientador: Dr. Pedro Coimbra Martins

Co-Orientador: Dr. Filipe Alberto Oliveira Carvalho

Supervisor: Eng. Mário Alberto Rodrigues Nogueira

Abril de 2014

Agradecimentos

Gostaria em primeiro lugar de agradecer ao meu orientador, o Dr. Pedro Coimbra Martins, ao meu co-Orientador, o Dr. Filipe Alberto Oliveira Carvalho e ao meu supervisor, o Eng^o Mário Alberto Rodrigues Nogueira, pela confiança, apoio, disponibilidade, compreensão e enorme paciência que tiveram comigo durante todo o estágio. Mesmo nos momentos mais complicados e com as minhas falhas, o ambiente foi sempre positivo e contei com o apoio de todos.

É importante sublinhar o apoio da empresa Wide Scope, que permitiu que o *sotware* “*routyn 3.20*” fosse utilizado neste trabalho para desenhar as rotas nos mapas.

Não podia deixar de agradecer também a todos os meus colegas e superiores, especialmente aos meus colegas de gabinete Joel Dinis e Carlos Jorge, pela amizade, conversas, boa companhia e paciência que tiveram comigo.

Um agradecimento vai também para o Dr. António Rui Trigo Ribeiro pela ajuda em alguns aspectos da linguagem Java.

Durante este período de tempo que misturou um grande conjunto de emoções boas e más, gostaria também de agradecer à minha namorada, que foi sempre uma grande ajuda. Gostaria de agradecer também aos meus pais, que de uma ou outra forma me deram apoio ou simplesmente força durante esta fase da minha vida.

Um outro agradecimento um pouco anónimo vai para as pessoas que não conheço mas que me deram algumas ajudas valiosas, que se deram ao trabalho de publicar na internet algumas informações (especialmente na parte de programação em Java), que foram essenciais para a conclusão do programa.

Finalmente, mas de grande importância, um grande obrigado aos meus amigos Francisco Lemos, David Pardal e Mário Rodrigues, pela boa amizade, pelas ajudas durante toda esta aventura.

Resumo

O presente relatório tem por objectivo apresentar e descrever de forma detalhada o projecto “Optimização de rotas na recolha de leite”. Este projecto foi conduzido no âmbito do estágio curricular, realizado na parte não-lectiva do Mestrado em Sistemas de Informação de Gestão, do Instituto Superior de Contabilidade e Administração de Coimbra, tendo decorrido na empresa Lacticoop entre 03 de Outubro de 2011 e 27 de Julho de 2012.

O projecto surge da necessidade da empresa otimizar as suas rotas de recolha de leite. Essa optimização pode ser subdividida em duas partes distintas: i) a recolha de dados, características e processos relativos à empresa e aos sistemas com que labora; ii) e o desenvolvimento do *software* necessário para a optimização de uma componente desses sistemas, associada ao processo de recolha de leite.

O primeiro ponto envolve a recolha de informação sobre a política interna da empresa, a recolha de dados acerca dos veículos, rotas, consumos e condutores, assim como o levantamento de procedimentos e tecnologias utilizadas. O segundo ponto envolve a modelação do problema em estudo, o levantamento das necessidades de *software* para implementar o sistema de informação, a avaliação de soluções de *software* e desenvolvimento/adaptação da aplicação informática, assim como a implementação do *software* desenvolvido / adaptado e testes.

Actualmente a empresa não dispõe de qualquer automatismo para a definição de rotas, sendo o processo de escalonamento de rotas feito manualmente. Este processo é bastante moroso e complexo, envolvendo a troca de informações entre o gestor e os condutores das viaturas. É um processo gradual, numa sequência de detecção de erros e correcção desses mesmos erros. Esta metodologia conduz a soluções bastante ineficientes, desde logo pela desactualização das soluções relativamente à efemeridade dos dados, especialmente ao nível de quantidades de recolha do produto. A razão da escolha de um sistema informático que permita otimizar as rotas prende-se essencialmente com a rapidez na obtenção de soluções e na capacidade de integração de dados actualizados. Este processo recorre a técnicas e modelos de optimização que envolvem o problema de Rotas de Veículos (*Vehicle Routing Problem*), sendo, em geral, um problema de difícil resolução em função do número de clientes envolvidos. Todavia, trata-se de um sistema que traz enormes benefícios no apoio ao processo de decisão por parte do gestor.

Neste estágio pretendeu-se, como objectivo principal, desenvolver uma aplicação que permita otimizar as rotas dos veículos envolvidos no processo de recolha de leite. Os benefícios do sistema na diminuição de distâncias percorridas pelas viaturas de recolha e no aumento da eficiência do sistema de transportes, serão evidenciados no trabalho desenvolvido.

A aplicação foi criada no *software* Eclipse (utilizando a linguagem Java). Na primeira fase do projecto estava previsto monitorizar as rotas e consumos dos veículos através da tecnologia de geo-posicionamento por satélite (GPS), de forma a atribuir comissões sobre a poupança de combustível aos condutores dos veículos. Não foi possível concluir esta fase devido à inexistência dessa tecnologia nas viaturas e pelo facto de a empresa ter retirado essa prioridade a esse investimento.

Palavras-chave: Optimização de rotas, análise de custos, eficiência económica, gestão de recursos, recolha de leite.

Abstract

This report aims to present and describe in detail the project "Optimization of routes in milk collection." This project was conducted under the traineeship, achieved in the non-academic part of the Master in Information Systems Management at the School of Accounting and Administration of Coimbra. The traineeship happened at the company Lacticoop between 1 October 2011 and 27 July of 2012.

The project arises from the need of the company to optimize their routes to collect milk. This optimization can be divided into two distinct parts : i) data collection, features related to the business processes and systems that the enterprise uses; and ii) the development of the software needed for the optimization of a component of these systems, associated with the process of milk collection.

The first point involves the collection of information on the company policy, the collection of data of vehicles, routes, fuel consumption and drivers, as well as lifting procedures and technologies used. The second point involves the modeling of the problem under study, assessing software needs to implement the information system, the evaluation of software solutions and development/adaptation of computer application, as well as the implementation of the software developed/adapted and tests.

At present, the company has no automatism for defining routes and the process for planning the routes is done manually. This process is quite lengthy and complex, involving the exchange of information between the route's manager and the drivers of the vehicles. It is a gradual process, a sequence of error detection and correction of those errors. This approach leads to quite inefficient solutions because they deal with ephemeral data, especially at the quantity of milk collected. The reason for the choice of a computer system that would optimize routes is mainly to get speedy solutions and the capacity of integrating current data. This process uses techniques and optimization models involving the vehicle routing problem (VRP). In general the VRP is a difficult problem to solve, depending on the number of customers involved. However, it is a system that brings huge benefits in supporting the decision process of the route's manager.

At this stage we intended, as its main objective, to develop an application that would optimize the routes of the vehicles involved in the milk collection process. The benefits of the system in reducing the distance traveled and increasing the efficiency of the transportation system will become apparent in the work.

The application was developed in Eclipse software (using the Java language). In the first phase of the project it was planned to monitor the fuel consumption of vehicles and routes through the geo-positioning satellite (GPS) technology in order to assign commissions on fuel savings for drivers of vehicles. It was not possible to complete this phase due to the absence of this technology in cars and the fact that the company has withdrawn this priority to this investment.

Keywords: routes optimization, cost analysis, economic efficiency, resource management, milk collection.

Índice de Conteúdos

1	- Introdução	1
1.1	- Política interna da empresa	2
1.2	- Breve história da Lacticoop	2
1.3	- Contexto e Motivação	3
1.4	- Descrição das etapas conduzidas no Estágio	4
1.5	- Plano geral do relatório	6
2	- Características do problema	6
3	- Recolha de dados	7
3.1	- Estacionamentos e Depósitos	7
3.2	- Distâncias e tempos entre estacionamentos, produtores e fábricas	10
3.3	- Clientes / Produtores de leite	11
3.3.1	- Distribuição geográfica dos clientes	12
3.3.2	- Especificidades da recolha de leite	15
3.4	- Veículos	17
3.5	- Condutores	18
3.6	- Rotas	18
3.7	- Alocação de clientes aos depósitos	19
4	- Construção de rotas	19
4.1	- Breve revisão da literatura	19
4.1.1	- O problema de alocação de clientes aos depósitos	19
4.1.2	- O Vehicle Routing Problem	19
4.1.3	- O Algoritmo de 2ª Ordem	21
4.2	- Formulação para o problema de alocação de clientes aos depósitos	21
4.3	- Formulação para a Metodologia exacta	22
4.4	- A Heurística de Clarke & Wright	24
4.5	- O Algoritmo de 2ª Ordem	28
5	- Resultados	29
5.1	- A alocação de clientes aos depósitos	30
5.1.1	- Zona1/Cluster 1	31

5.1.2	- Zona2/Cluster2	32
5.1.3	- Zona3/Cluster3	33
5.1.4	- Zona4/Cluster 4	34
5.2	- Alocação Inicial	35
5.2.1	- A metodologia exacta	35
5.2.2	- Zona 1	38
5.2.3	- Zona 2	41
5.2.4	- Zona 3	45
5.2.5	- Zona 4	50
5.3	- Nova Alocação	52
5.3.1	- Cluster 1	52
5.3.2	- Cluster 2	55
5.3.3	- Cluster 3	57
5.3.4	- Cluster 4	61
5.4	- Análise e comparação de resultados	63
6	- Estudo computacional	69
6.1	- <i>Hardware</i> utilizado para resolução do problema	69
6.2	- <i>Software</i> utilizado para resolução do problema - a aplicação Eclipse	69
7	- Conclusões e Perspectivas de Trabalho Futuro	70
7.1	- Principais Conclusões do Trabalho Desenvolvido	70
7.2	- Perspectivas Futuras	71
7.3	- Considerações Pessoais	71
8	- Anexos	72

Índice de Anexos

<i>Anexo 1 - Questionário aos produtores (exemplar):</i>	72
<i>Anexo 2 - Lista de veículos</i>	73
<i>Anexo 3 - Função objetivo da metodologia exacta: Zona 4</i>	74
<i>Anexo 4 - Distâncias percorridas: Zona 1 (primeiro semestre de 2011)</i>	75
<i>Anexo 5 - Tratamento de dados</i>	78

Lista de Acrónimos e siglas

C – Graus centígrados.

Estac. – Estacionamento.

Depot – Depósito.

Km – Quilómetro.

Mt - Metro.

L – Litros.

Min – Minutos.



-Localização do depósito.



-Localização do estacionamento.

(*) – Erro de arredondamento.

VRP – Vehicle Routing Problem.

CW – Clarke and Wright.

s-Segundos.

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 - Distribuição de tarefas durante o estágio</i>	4
<i>Tabela 2 - Resumo do inquérito aos produtores</i>	16
<i>Tabela 3 - Resumo das janelas de recolha</i>	16
<i>Tabela 4 - Resumo das rotas existentes na empresa</i>	18
<i>Tabela 5 - Tabela “Savings” - Zona 4</i>	26
<i>Tabela 6 - Análise de sensibilidade – Alocação</i>	30
<i>Tabela 7 - Análise de sensibilidade Zona 4 – Metodologia exacta</i>	35
<i>Tabela 8 – Rotas da Zona 4 – Solução da metodologia exacta</i>	36
<i>Tabela 9 - Solução “Rota 1” – Metodologia Exacta</i>	36
<i>Tabela 10 – Resultados da Heurística de Clarke & Wright – Zona 1</i>	38
<i>Tabela 11 - Exemplo de rota criada na Zona 1 (Rota 3) – Heurística de Clarke & Wright</i>	38
<i>Tabela 12 - Resultados do Algoritmo de 2ª Ordem - Zona 1</i>	40
<i>Tabela 13 - Exemplo de rota criada na Zona 1 (Rota 8) –Algoritmo de 2ª Ordem</i>	40
<i>Tabela 14 - Resultados da Heurística de Clarke & Wright – Zona 2</i>	42
<i>Tabela 15 - Exemplo de rota criada na Zona 2 (Rota 42) – heurística de Clarke & Wright</i>	42
<i>Tabela 16 - Resultados do Algoritmo de 2ª Ordem - Zona 2</i>	44
<i>Tabela 17 - Exemplo de rota criada na Zona 2 (Rota 114) – Algoritmo de 2ª Ordem</i>	44
<i>Tabela 18 - Resultados do Heurística de Clarke & Wright – Zona 3</i>	46
<i>Tabela 19 - Exemplo de rota criada na Zona 3 (Rota 23) – Heurística de Clarke & Wright</i>	47
<i>Tabela 20 - Resultados do Algoritmo de 2ª Ordem - Zona 3</i>	48

<i>Tabela 21 - Exemplo de rota criada na Zona 3 (Rota 38) – Algoritmo de 2ª Ordem</i>	49
<i>Tabela 22 - Resultados da Heurística de Clarke & Wright – Zona 4</i>	50
<i>Tabela 23 - Exemplo de rota criada na Zona 4 (Rota 1) – Heurística de Clarke & Wright</i>	51
<i>Tabela 24 - Resultados da Heurística de Clarke & Wright com alocação – Cluster 1</i>	52
<i>Tabela 25 - Resultados do Algoritmo de 2ª Ordem com alocação - Cluster 1</i>	53
<i>Tabela 26 - Exemplo de rota criada na Cluster 1 (Rota 2) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação</i>	54
<i>Tabela 27 - Resultados da Heurística de Clarke & Wright com alocação – Cluster 2</i>	55
<i>Tabela 28 - Resultados do Algoritmo de 2ª Ordem com alocação - Cluster 2</i>	56
<i>Tabela 29 - Exemplo de rota criada na Cluster 2 (Rota 75) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação</i>	56
<i>Tabela 30 - Resultados da Heurística de Clarke & Wright com alocação – Cluster 3</i>	58
<i>Tabela 31 - Resultados do Algoritmo de 2ª Ordem com alocação - Cluster 3</i>	59
<i>Tabela 32 - Exemplo de rota criada na Cluster 3 (Rota 23) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação</i>	59
<i>Tabela 33 - Resultados da Heurística de Clarke & Wright com alocação – Cluster 4</i>	61
<i>Tabela 34 - Resultados do Algoritmo de 2ª Ordem com alocação - Cluster 4</i>	62
<i>Tabela 35 - Exemplo de rota criada na Cluster 4 (Rota 1) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação</i>	62
<i>Tabela 36 - Resumo de resultados: Heurística de Clarke & Wright</i>	64
<i>Tabela 37 - Resumo de resultados: Algoritmo de 2ª Ordem</i>	64
<i>Tabela 38 - Resumo de resultados: heurística de Clarke & Wright com alocação</i>	65
<i>Tabela 39 - Resumo de resultados: Algoritmo de 2ª Ordem com alocação</i>	66
<i>Tabela 40 - Resumo de resultados</i>	66
<i>Tabela 41 – Comparação de resultados relativamente às rotas originais</i>	67
<i>Tabela 42 - Tabela comparativa entre as metodologias de optimização</i>	68

Índice de Ilustrações

<i>Ilustração 1 - Fluxo de viaturas e meios monetários</i>	7
<i>Ilustração 2 - Oficina de mecânica na zona industrial da Tocha</i>	9
<i>Ilustração 3 - Entrada do estacionamento (local do estágio)</i>	9
<i>Ilustração 4 - Zona de abastecimento de combustível</i>	10
<i>Ilustração 5 - Distribuição geográfica dos clientes, depósitos e estacionamentos, por zonas</i>	12
<i>Ilustração 6 - Distribuição geográfica de clientes Zona 1</i>	13
<i>Ilustração 7 - Distribuição geográfica de clientes Zona 2</i>	13
<i>Ilustração 8 - Distribuição geográfica de clientes Zona 3</i>	14
<i>Ilustração 9 - Distribuição geográfica de clientes Zona 4</i>	14
<i>Ilustração 10 – Conceito de Poupanças</i>	25
<i>Ilustração 11 – Conceito de Poupanças com ponto de origem e de chegada distintos</i>	25
<i>Ilustração 12 - Fluxograma da Heurística de Clarke & Wright</i>	27
<i>Ilustração 13 - Pseudocódigo do Algoritmo de 2ª ordem</i>	29
<i>Ilustração 14 - Mapa comparativo: Zona 1 VS novo Cluster 1</i>	31
<i>Ilustração 15 - Mapa comparativo: Zona 2 VS novo Cluster 2</i>	32
<i>Ilustração 16 - Mapa comparativo: Zona 3 VS novo Cluster 3</i>	33
<i>Ilustração 17 - Mapa comparativo: Zona 4 VS novo Cluster 4</i>	34
<i>Ilustração 18 - Solução “Rota 1” – Metodologia Exacta</i>	37
<i>Ilustração 19 - Representação geográfica – Zona 1 (Rota 3) – Heurística de Clarke & Wright</i>	39
<i>Ilustração 20- Representação geográfica – Zona 1 (Rota 8) – Algoritmo de 2ª Ordem - Zona1</i>	41
<i>Ilustração 21 - Representação geográfica – Zona 2 (Rota 42) – Heurística de Clarke & Wright</i>	43
<i>Ilustração 22 - Representação geográfica - Zona 2 (Rota 114) – Algoritmo de 2ª Ordem</i>	45

<i>Ilustração 23 - Representação geográfica – Zona 3 (Rota 23) – Heurística de Clarke & Wright</i>	<i>47</i>
<i>Ilustração 24 - Representação geográfica - Zona 3 (Rota 38) – Algoritmo de 2ª Ordem</i>	<i>49</i>
<i>Ilustração 25 -Representação geográfica – Zona 4 (Rota 1) – Heurística de Clarke & Wright</i>	<i>51</i>
<i>Ilustração 26 - Representação geográfica - (Rota 2) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação- Cluster 1</i>	<i>54</i>
<i>Ilustração 27 - Representação geográfica (Rota 75) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação - Cluster 2</i>	<i>57</i>
<i>Ilustração 28 - Representação geográfica - (Rota 23) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação- Cluster 3</i>	<i>60</i>
<i>Ilustração 29 - Representação geográfica – (Rota 1) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação - Cluster 4</i>	<i>63</i>

1 - Introdução

O presente relatório enquadra-se no estágio curricular realizado no 2º ano do Mestrado em Sistemas de Informação para Gestão.

O estágio teve a duração de dez meses, com uma carga semanal de quarenta horas, perfazendo um total de 1920 horas, cumprindo o previsto no plano de estudos e no artigo 21º alínea 4 do regulamento dos Cursos do 2º Ciclo (Mestrados) do Instituto Superior de Contabilidade de Coimbra.

O estágio foi efectuado na empresa Lacticoop, com o apoio da empresa Wide Scope entre Outubro de 2011 e Julho de 2012. Foi realizado nas instalações da empresa Lacticoop, na zona industrial da Tocha. Na empresa Wide Scope, com sede em Lisboa, foram sendo agendadas reuniões para a realização da co-orientação.

O horário de trabalho foi integralmente cumprido, de Segunda a Sexta, das 9 horas às 13 horas e das 14 horas às 18 horas, com uma hora de almoço, num total de 8 horas em cada dia de trabalho.

A Lacticoop - União de Cooperativas de Produtores de Leite de Entre Douro e Mondego UCRL, é uma união de 23 cooperativas agrícolas cuja actividade principal é a recolha e concentração de leite, originária de um conjunto de produtores. Para além do transporte de lacticínios, a Lacticoop utiliza a sua frota para o transporte de outros tipos de líquidos ligados à área alimentar (como por exemplo a água).

A empresa presta também alguns serviços complementares aos criadores de gado:

- A venda e apoio consultivo de nutrição animal;
- Venda de produtos agro-rurais (distribuídos por três lojas na zona centro);
- O SMIA - Serviços de Melhoramento e Inseminação Artificial, (o qual pretende garantir um serviço de inseminação artificial eficiente ao efectivo leiteiro e disponibilizar uma oferta de material genético actual e adequado aos diferentes tipos de explorações que são servidas);
- A recria de novilhas leiteiras (cujo objectivo é garantir o fornecimento de jovens reprodutoras para a produção de leite, valorizando o património genético regional e consequentemente os serviços e acções que intervêm na concretização desse objectivo);
- As representações, as quais pretendem garantir às explorações o fornecimento de equipamentos e produtos mais adequados e ao melhor preço, para o desempenho de todas as actividades ligadas à produção de leite;

A Wide Scope, com sede em Lisboa, desenvolve soluções de optimização em áreas como planeamento e sequenciamento de produção, logística e gestão de recursos humanos. A tecnologia utilizada tem sido aplicada com sucesso em sectores tão diversos como a produção industrial, a distribuição, os transportes, o audiovisual ou a administração pública. A Wide Scope está totalmente focada na optimização e trabalha em grande proximidade com os seus parceiros o que permite a partilha de experiências e tecnologias.

O objectivo do estágio foi desenvolver um *software* para utilização na empresa Lacticoop, que permita resolver um problema de rotas de veículos (*Vehicle Routing Problem*) na recolha de leite. Apesar de se tratar de um problema de difícil resolução, em função do número de clientes envolvidos, pretende-se que o modelo desenvolvido possa gerar soluções que beneficiem o sistema operacional de transporte de leite da empresa, nomeadamente: i) em termos de optimização e redução das distâncias percorridas pelos veículos; ii) na diminuição do tempo de obtenção de soluções (que limitaremos a 24 horas); e iii) na possibilidade de gerar, de forma eficiente, cenários alternativos, resultantes de alterações que a empresa possa pretender simular.

Não foi possível desenvolver uma análise do processo de benefícios remuneratórios associados ao sistema de transporte (comissões atribuídas aos condutores, associadas à utilização dos veículos), devido à inexistência da tecnologia de GPS nas viaturas, como forma de monitorizar as rotas e os consumos das mesmas. Esta impossibilidade decorreu de decisões da própria empresa.

1.1 - Política interna da empresa

A empresa Lacticoop dedica-se ao transporte de leite entre os produtores e as fábricas transformadoras deste produto.

As fábricas transformadoras não possuem frota própria para a recolha dos lacticínios. Em alternativa, recorrem ao *outsourcing*. A empresa Lacticoop adquire o leite aos produtores e vende-o às fábricas transformadoras. A diferença entre o preço de compra e de venda (que é negociado por litro) reflecte a margem de lucro bruta nesta actividade.

É prática da empresa reabastecer de combustível os camiões depois da finalização de cada rota, procedendo, nessa ocasião, ao controlo dos consumos. O abastecimento é efectuado numa zona delimitada por linhas inscritas no chão, de forma a encher o depósito dos camiões sempre de forma igual.

1.2 - Breve história da Lacticoop

A Lacticoop foi constituída em 23 de Março de 1962 na sequência das deliberações tomadas nas Assembleias Gerais das Cooperativas de Arouca, Vale do Vouga e Sanfins, dando assim corpo a um projecto que viria a tornar-se imparável na defesa dos pequenos agricultores dos concelhos de Arouca, Sever do Vouga e Vale de Cambra, cabendo a responsabilidade pela implementação e desenvolvimento deste projecto colectivo à primeira direcção presidida pelo Senhor Padre Celestino da Silva Correia Amaral.

Os princípios que estiveram na base da sua constituição foram: defender os produtores e a produção de leite nacional, e por consequência as Organizações Cooperativas.

Durante o período Salazarista as cooperativas eram quase consideradas como sendo organizações comunistas, daí a necessidade do aparecimento de uma estrutura capaz de acolher e congregar esforços em torno do mesmo objetivo: o desenvolvimento da agricultura e da produção de leite.

Após o 25 de Abril de 1974, novas cooperativas agrícolas foram surgindo na região como sucessoras naturais dos ex-grémios da lavoura e que se foram associando à Lacticoop, perfazendo o número máximo de 26 associadas, sendo hoje 18 cooperativas.

Em 1965 é implementado um projecto de recolha única ao qual também aderiu a Cooperativa Agrícola de Oliveira de Azeméis, que se havia associado à União em 1964.

Se durante os primeiros anos de existência da União o leite recolhido era essencialmente utilizado na produção de manteiga, com o aumento das quantidades recolhidas tornou-se imperioso iniciar a produção de queijo, o que veio a verificar-se em Maio de 1967.

Em 1970 a União deu início à recolha de leite na cidade de Viseu e concelhos circunvizinhos, alargando-se progressivamente aos Distritos de Aveiro e Coimbra.

Em 1971 estende-se ao Litoral com a adesão da Cooperativa Agrícola de Aveiro, Ílhavo e Vagos, procedendo-se nessa altura à alteração de designação social para Lacticoop - União de Cooperativas de Produtores de Leite de Entre Douro e Mondego, que ainda se mantém nos dias de hoje.

Para além da organização da recolha e melhoria contínua da qualidade do leite, a Lacticoop procurou sempre ajudar os seus produtores através do aconselhamento técnico especializado nas várias áreas que constituem uma exploração leiteira. A prova disso é o elevado número de Técnicos Agrários, Economistas, Químicos e Veterinários que estiveram, ou ainda estão, ao serviço da Lacticoop.

Nas primeiras décadas, o papel principal da Lacticoop foi fomentar a produção de leite na sua área de influência, passando dos 100 milhões de litros/ano em 1976 para 202 milhões de litros/ano em 1988, aliado ao lançamento no mercado de novos produtos lácteos onde a qualidade foi sempre uma referência para o consumidor. Como exemplo da excelência dos seus produtos fica para a história da Lacticoop o leite Matinal.

Nos últimos anos a actividade da recolha de leite da União tem estabilizado na ordem dos 160 milhões de litros anuais.

Com a integração de Portugal na União Europeia houve a necessidade de se estudarem novas formas de actuação no mercado do leite e, mais uma vez, no seio do movimento cooperativo, houve o bom senso de unir esforços. Daí resultou a constituição em 1995 da Lactogal Produtos Alimentares SA, pelas três grandes organizações cooperativas Agros, Lacticoop e Proleite, no sentido de defender os produtores Portugueses da invasão maciça de produtos lácteos vindos dos principais países produtores da Europa.

1.3 - Contexto e Motivação

Uma das grandes preocupações das empresas e indústrias é proporcionar, com um custo mínimo, um serviço adequado à expectativa dos seus clientes, colocando-se acima dos padrões oferecidos por empresas concorrentes. A influência directa no custo dos serviços prestados pode ser a chave do sucesso ou fracasso de uma empresa. Sendo a Lacticoop um prestador de serviços na área dos transportes de líquidos, é de extrema importância uma minimização dos custos com os combustíveis, que pode ser feita através de três formas:

- Através da diminuição da distância percorrida pelos veículos, sem uma alteração no número de clientes;
- Através da diminuição do número de saídas de veículos (diminuição do número de rotas de recolha), sendo a poupança não só no desgaste dos veículos, mas também ao nível dos recursos humanos;
- Controlo eficiente da condução, de forma a monitorizar não só o consumo de combustíveis mas também o consumo de travões, pneus, embreagem, entre outros;

O transporte de cargas em Portugal é, em geral, rodoviário. Os gastos deste tipo de transporte são elevados devido ao aumento constante no preço dos combustíveis, à cobrança de portagens, e ao desgaste de materiais, incluindo o desgaste provocado por deficiências no piso.

Para além do desgaste das vias, a Lacticoop depara-se com outro problema, relacionado com o volume de carga em alguns clientes, nomeadamente: i) as dimensões do espaço físico onde é feita a recolha (os quais dificultam ou impossibilitam a entrada de camiões cisterna de maior capacidade) e ii) o volume do tanque de armazenamento de leite e da perecibilidade da matéria-prima recolhida (o leite não pode permanecer mais de 48 horas nos tanques de armazenamento, o que obriga a recolhas frequentes).

O processo de construção de rotas actualmente em vigor na empresa é muito moroso, pois é efectuado manualmente. Este procedimento inibe uma actualização regular das soluções, sempre que surgem alterações nos dados envolventes, nomeadamente nos volumes de recolha de leite nos produtores\clientes. Estas alterações poderão conduzir a uma completa reformulação das rotas, com

vista a um planeamento eficiente das quantidades a recolher em cada instante (dia). A razão da escolha de um processo automático para otimizar as rotas prende-se essencialmente com a possibilidade de gerar rotas eficientes e de forma desejavelmente rápida, permitindo simular cenários alternativos, em função de alterações sensíveis nos parâmetros em análise. A obtenção de soluções exactas para este problema, recorrendo a formulações em programação linear inteira ou inteira-mista, são difíceis de obter, ganhando dificuldade com o aumento da dimensão do mesmo: por este motivo, é comum recorrer-se a heurísticas que, apesar de perderem garantia de optimalidade, permitem alcançar soluções eficientes em problemas de grande dimensão, tornando-se uma mais-valia para o operador.

1.4 - Descrição das etapas conduzidas no Estágio

Ao longo do período de realização do estágio foram concretizadas várias tarefas que se discriminam no Quadro 1.

Mês	Tarefas	
Outubro de 2011	T1	Familiarização com o ambiente empresarial
Novembro de 2011	T2	Recolha de informação
Dezembro de 2011		
Janeiro de 2012	T3	Modelação do problema em estudo
Fevereiro de 2012		
Março de 2012	T4	Levantamento das necessidades de <i>software</i>
Abril de 2012	T5	Avaliação de soluções de software e desenvolvimento/adaptação da aplicação informática com o apoio da empresa Widescope
Maio de 2012 até Março de 2013	T6	Implementação do <i>software</i> desenvolvido / adaptado e teste
Até à data de entrega do relatório	T7	Elaboração do relatório de estágio

Tabela 1 - Distribuição de tarefas durante o estágio

Tarefa T1:

No dia 03 de Outubro de 2011 iniciou-se o referido estágio na empresa Lacticoop, situada na zona industrial da Tocha, na localidade de Berlengas.

A apresentação a todos os colaboradores da empresa, nomeadamente os gestores, os funcionários de escritório, os mecânicos, os condutores e os seguranças, foram a tarefa principal no primeiro dia de estágio. Este dia inaugural serviu também para organizar o meu posto de trabalho.

Parte do dia seguinte foi destinada a uma reunião com o gestor de frota e dois condutores. Nesta reunião ficaram agendadas duas viagens com os condutores dos veículos de recolha, que gentilmente se disponibilizaram a mostrar o seu trabalho. Neste contexto foram efectuadas duas rotas de recolha de leite, na região próxima da fábrica de lacticínios Lactogal e do local do estágio (onde os veículos se encontram estacionados), ambos na zona da Tocha, para melhor conhecer este processo no terreno. Esta experiência foi muito importante, para comprovar na prática alguns constrangimentos quer em termos de tempo, quer de dimensão das viaturas.

Tarefa T2:

Os dados de clientes e veículos foram retirados manualmente dos registos diários de rotas existentes na empresa, como por exemplo:

- Código de cliente;
- Matrícula, código, capacidade e número de eixos dos veículos de recolha;
- A capacidade das bombas de sucussão presente nos veículos (dados recolhidos na oficina de mecânica, através da análise do modelo das bombas e respectiva potência);
- A produção de leite por exploração agrícola;
- As janelas horárias das ordenhas por cada exploração agrícola (através do Anexo 1).

Todos os dados foram arquivados em formato “Excel” para serem posteriormente utilizados pela empresa;

Tarefa T3:

Para a modelação do problema foi desenvolvido um trabalho de pesquisa de literatura sobre *Vehicle Routing Problem* (VRP). Na sequência dessa pesquisa foi desenvolvida uma formulação matemática específica para o problema em estudo, seguindo directrizes do Orientador, depois de algumas reuniões no Instituto Superior de Contabilidade e Administração de Coimbra.

Tarefa T4:

O levantamento de necessidades de *software* foi conduzido com o apoio do Co-orientador Dr. Filipe Alberto Oliveira Carvalho na empresa Widescope, canalizando a escolha do software de programação para o programa Eclipse. Esta escolha foi baseada na enorme experiência da empresa Widescope neste sector, gerando um plano de desenvolvimento fundamental para as etapas seguintes.

Tarefa T5:

Depois de escolhido o *software* Eclipse, veio o estudo dos princípios fundamentais de programação em Java, seguido do desenvolvimento da aplicação, com a ajuda do co-Orientador e, pontualmente, do Doutor António Rui Trigo Ribeiro.

Tarefa T6:

Esta tarefa, bastante longa no tempo, envolveu a implementação do *software* desenvolvida de origem. Adicionalmente, foram realizados testes aos algoritmos construídos.

Foi ainda conduzida uma análise comparativa entre os resultados gerados pelo *software* e os resultados obtidos pelo procedimento tradicional, usando dados do planeamento realizado no ano anterior.

Tarefa T7:

Por último, mas não menos importante, foi redigida esta tese.

1.5 - Plano geral do relatório

Na próxima secção será feita uma descrição global do problema em estudo, sendo descritas as características específicas dos dados na secção 3. Na secção 4 - construção de rotas - apresenta-se uma breve revisão bibliográfica, que serve de base à construção das formulações matemáticas do problema de alocação de clientes aos depósitos e do algoritmo exacto, para o problema de rotas de veículos. É neste capítulo também que se apresentam os fundamentos da heurística de Clarke and Wright e da heurística de 2ª Ordem. Na secção 5 apresentam-se os resultados da construção de rotas, bem como a comparação das rotas obtidas com as existentes na empresa. Na secção 6 descrevem-se o *hardware* e *software* utilizados neste trabalho. O capítulo 7 foi reservado para conclusões e algumas ideias para trabalho futuro. Na secção 8 são apresentados os anexos, incluindo documentos que, devido à sua dimensão, foram colocados num capítulo à parte.

2 - Características do problema

Neste estágio pretendeu-se, como objectivo principal, desenvolver uma aplicação informática que permitisse resolver o problema da optimização de rotas na empresa Lacticoop, de forma a apresentar uma proposta que evidenciasse a diminuição da distância percorrida das viaturas que efectuem a recolha de leite, cumprindo todos os requisitos definidos. Essa diminuição deveria reflectir uma redução no consumo de combustível.

Este trabalho tem como missão criar uma ferramenta de apoio à gestão, mais especificamente, uma ferramenta para apoiar o gestor da frota de veículos da empresa em causa. Pretende-se uma diminuição da distância percorrida pelos veículos, ou pelo menos, uma solução informática que permita optimizar essa distância sempre que ocorram modificações significativas nos parâmetros do problema. É também de grande importância para a gestão ter um perfeito conhecimento de quais as janelas temporais de recolha óptimas. Esse conhecimento poderá ser uma mais-valia para a empresa, podendo trazer alguns benefícios em termos financeiros, diminuindo a complexidade do sistema de recolha. Na Ilustração 1 esquematiza-se o procedimento de recolha de leite, meios monetários e principais características de cada um dos locais.

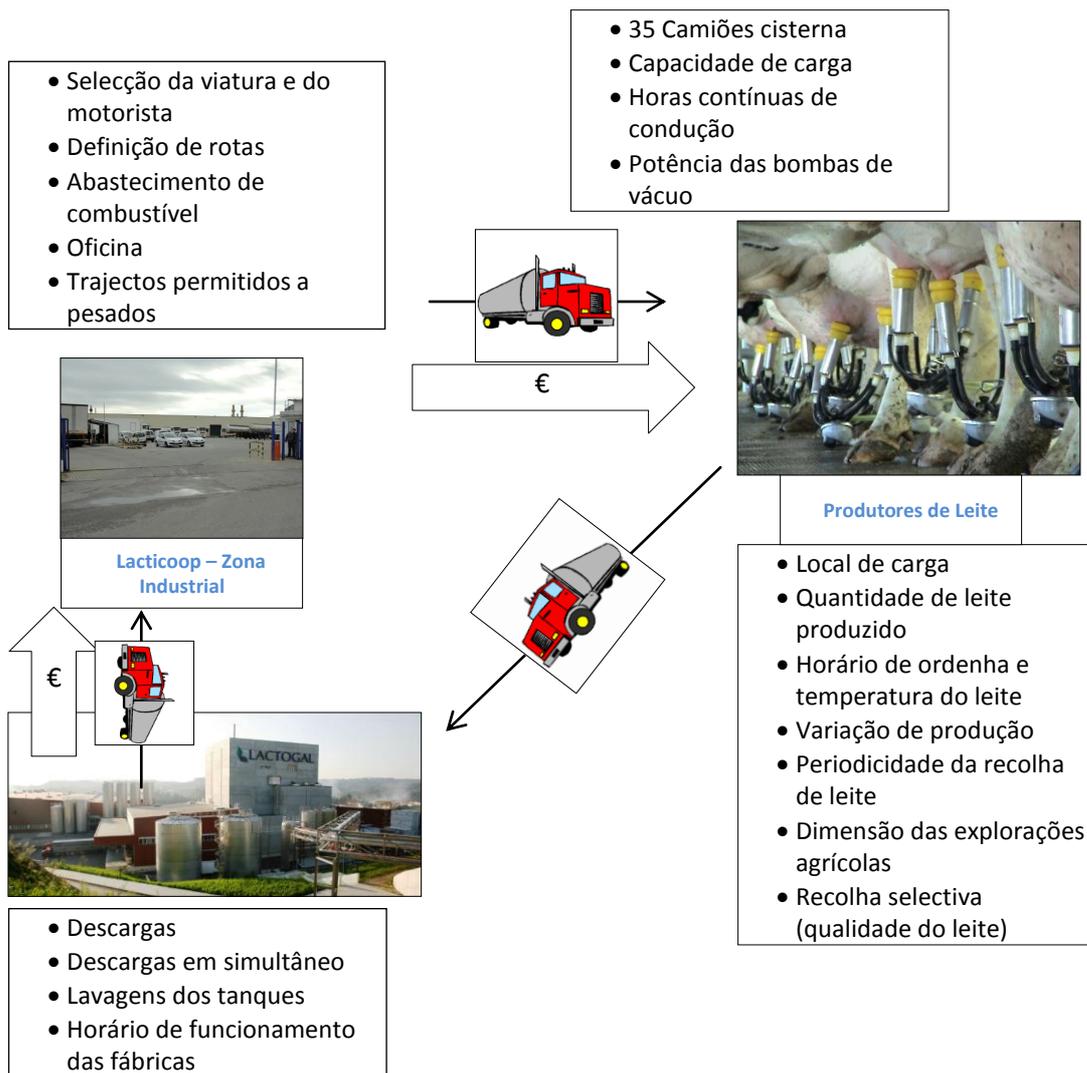


Ilustração 1 - Fluxo de viaturas e meios monetários

3 - Recolha de dados

3.1 - Estacionamentos e Depósitos

Neste ponto abordaremos os estacionamentos e os depósitos (que são fábricas de lacticínios). A denominação “estacionamento” significa o ponto de partida dos veículos para os clientes. Por outro lado, o “depósito” é o local de descarga da mercadoria logo, o ponto final de cada rota. Outro aspecto relevante aqui tratado são as “zonas”. As zonas são “clusters” de clientes e, em cada cluster, existe um estacionamento (início de cada rota) e um depósito (final de cada rota). As combinações depósito\estacionamento existentes são as seguintes:

- Lactogal de Oliveira de Azeméis / Estacionamento de Arouca (Zona 1 – Interior Norte);
- Lactogal da Tocha (Litoral) / Estacionamento da Tocha (Zona 2 – Litoral Norte);

- Renoldy / Estacionamento de Águas De Moura (Zona 3 – Centro-Sul);
- Parmalat / Estacionamento de Águas De Moura (Zona 4-Sul);

Como podemos verificar o estacionamento de Águas de Moura serve dois depósitos. No entanto, os veículos associados a este estacionamento estão alocados a cada um dos depósitos, ou seja, o estacionamento é o mesmo para as duas zonas mas, para cada um dos clusters, os veículos não se repetem.

No término de cada rota, a matéria-prima é descarregada nas fábricas de lacticínios de cada cluster. Estes tempos de descarga são caracterizados por três factores:

- As fábricas não permitem mais do que 3 descargas em simultâneo;
- A obrigatoriedade da lavagem dos tanques no final de cada descarga;
- O número de análises feitas antes da entrada da matéria-prima nos tanques das fábricas de lacticínios (uma análise para cada produtor);

Os horários de funcionamento de cada fábrica são:

- Lactogal Oliveira de Azeméis (Norte) – 08 horas às 20 horas (Cluster 1);
- Lactogal Tocha (Litoral) - 08 horas às 22 horas (Cluster 2);
- Renoldy (Centro-Sul) -08 horas às 20 horas (Cluster 3);
- Parmalat (Sul) -08 horas às 20 horas (Cluster 4);

As necessidades de matéria-prima em cada fábrica variam com o tempo, dependendo do planeamento da quantidade de derivados do leite a produzir. Na ocasião em que foram recolhidos os dados para o presente trabalho, os valores esperados de procura de leite diários em cada cluster eram os seguintes:

- Lactogal Oliveira de Azeméis (Norte) – 53361 L;
- Lactogal Tocha (Litoral) – 167822 L;
- Renoldy (Centro-Sul) – 138580 L;
- Parmalat (Sul) – 19461 L;

Estes dados foram obtidos através da soma da produção de cada cliente em cada cluster. Esta distribuição de necessidades é variável e pode ser ajustada pelas fábricas de dia para dia.



Ilustração 2 - Oficina de mecânica na zona industrial da Tocha

Os estacionamento estão localizados perto das fábricas onde se descarrega o produto. O respectivo horário de funcionamento é o seguinte:

- Tocha (Litoral- Local do estágio) – das 8 horas às 22 horas;
- Arouca (Norte) – das 8 horas às 20 horas;
- Águas de Moura (Sul e Centro-Sul) – das 8 horas às 20 horas;

Nas ilustrações 2 a 4, mostram-se algumas imagens do local de estágio nomeadamente da oficina de mecânica, da entrada do estacionamento onde é controlada a entrada e saída de viaturas e da zona de abastecimento de combustível.



Ilustração 3 - Entrada do estacionamento (local do estágio)

3.2 - Distâncias e tempos entre estacionamentos, produtores e fábricas

As distâncias e tempos foram recolhidos automaticamente através do Google Maps (<https://maps.google.pt/>), recorrendo à tecnologia Java. Estes dados foram armazenados em arquivos de formato texto (txt) (um arquivo por zona ou cluster, com as distâncias e tempos entre clientes, depósito e estacionamento de cada cluster\zona), servido de dados de input aos programas desenvolvidos. Embora as distâncias e tempos medidos através do “Google Maps” indiquem, em alguns dados preliminares, diferenças que pudessem justificar a assimetria das matrizes destes dados, optou-se neste trabalho por considerar estes dados como simétricos, tomando apenas os triângulos superiores das matrizes de distâncias e tempos recolhidas. Esta opção decorre do facto das diferenças assinaladas serem negligenciáveis face à amplitude dos valores de distâncias e tempos em causa. Além disso, as versões simétricas das heurísticas que irão ser tratadas mais à frente, são mais eficientes do que as correspondentes versões assimétricas. Refira-se ainda que o próprio “Google Maps” impõe limitações ao número de pedidos feitos ao servidor (limitado a uma consulta por segundo e 40000 consultas por mês conforme descrito em <https://support.google.com/mapsengine/answer/3342103>).

No Anexo 5 – “Tratamento de dados”, é apresentado um exemplo deste ficheiro de texto que



Ilustração 4 - Zona de abastecimento de combustível

contém a matriz de distâncias, apenas para a zona 4. Não foram apresentadas todas as matrizes devido à dimensão das mesmas.

A primeira coluna do ficheiro refere-se ao código utilizado para indicar a ligação entre clientes, depósitos ou estacionamentos. Esta ligação contém o código do ponto de partida (cliente ou estacionamento) e o código do ponto de chegada (cliente ou depósito), divididos pelo carácter “_”. Na segunda e terceira colunas são apresentados a distância (em Mt) e o tempo (em Min) para cada ligação da primeira coluna.

3.3 - Clientes / Produtores de leite

A carteira de clientes da Empresa integra um total de 484 produtores de leite. Estes produtores de leite localizam-se num espaço geográfico extenso, indo desde o centro norte até ao sul do país, abrangendo assim uma dimensão territorial bastante grande. Refira-se, porém, que a maior parte dos clientes se situam nas beiras. Estes produtores dividem-se em quatro clusters: Norte (zona 1 – 146 clientes), Centro Litoral (zona2 – 290 clientes), Centro Sul (zona3 – 43 clientes) e a Sul 2 (zona4 – 5 clientes). Na ilustração 5, no mapa à esquerda, mostra-se a localização de todos os clientes.

A Empresa dispõe de 4 localizações diferentes para recolha de leite, designadas de depósitos e 3 locais distintos para o estacionamento das viaturas. Os veículos partem do estacionamento e terminam a rota nos locais de depósito. Após a descarga do leite nos depósitos, a viatura volta ao respectivo estacionamento. Cada uma das quatro zonas referidas possui um local específico para estacionamento das viaturas e um local específico de depósito. Esse local de depósito recolhe o leite dos clientes integrados na respectiva zona. Na ilustração 5, no mapa à direita, mostra-se a localização dos 4 depósitos e dos 3 locais de estacionamento. De referir que a zona de descarga da Zona 3 é a mesma que na Zona 4, ou seja, temos 3 zonas de partida de veículos, e 4 zonas de chegada.

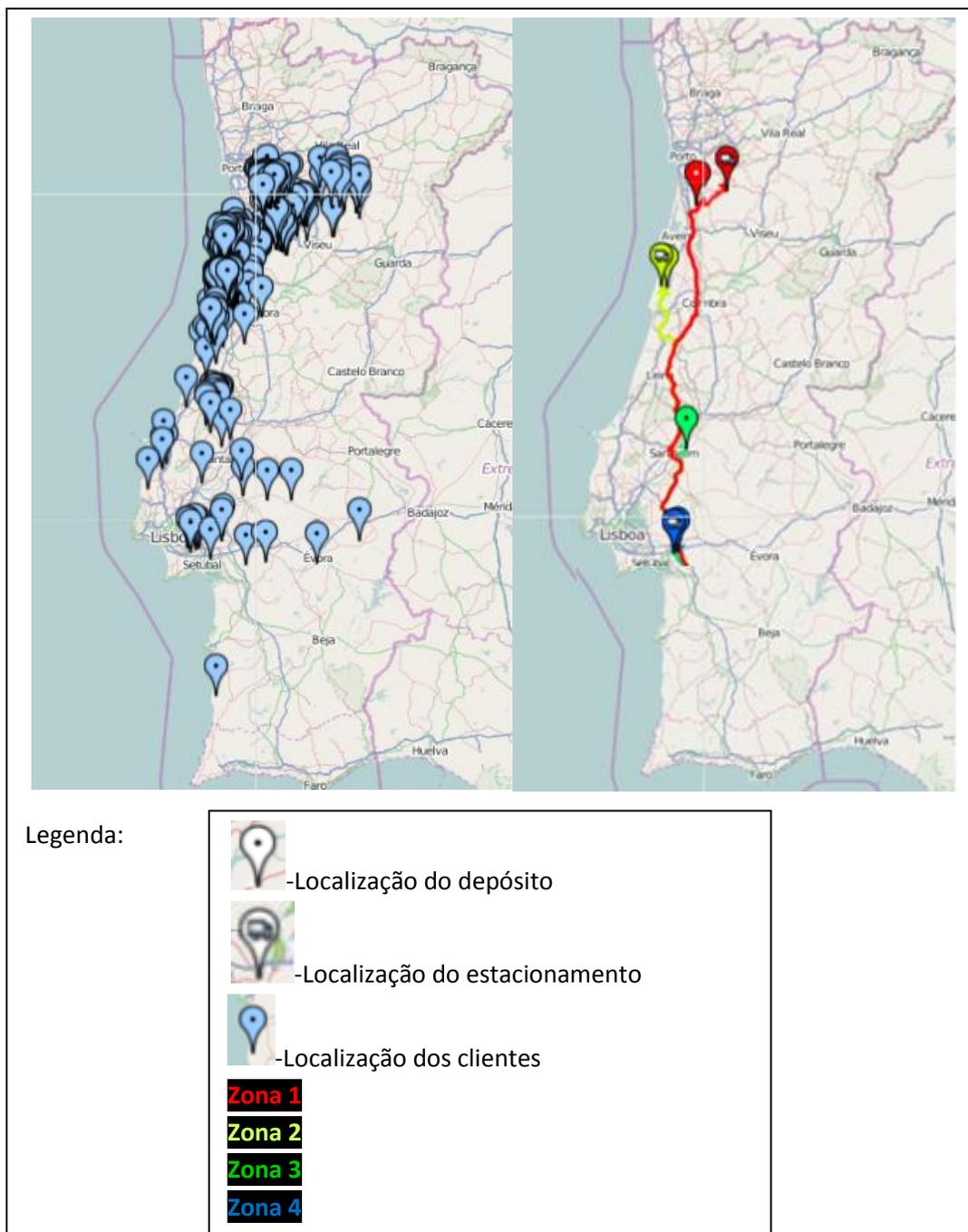


Ilustração 5 - Distribuição geográfica dos clientes, depósitos e estacionamentos, por zonas

3.3.1 - Distribuição geográfica dos clientes

O conjunto total de clientes distribui-se de forma diferente pelas quatro zonas anteriormente referidas. Nas ilustrações 6 a 9 mostra-se a localização geográfica de cada uma desses clientes, dentro da respectiva zona. Esta distribuição corresponde ao plano que actualmente vigora na empresa, seguindo os critérios que a administração considerou mais adequados.

A zona 1 (Norte) totaliza 146 clientes distribuídos geograficamente da seguinte forma:

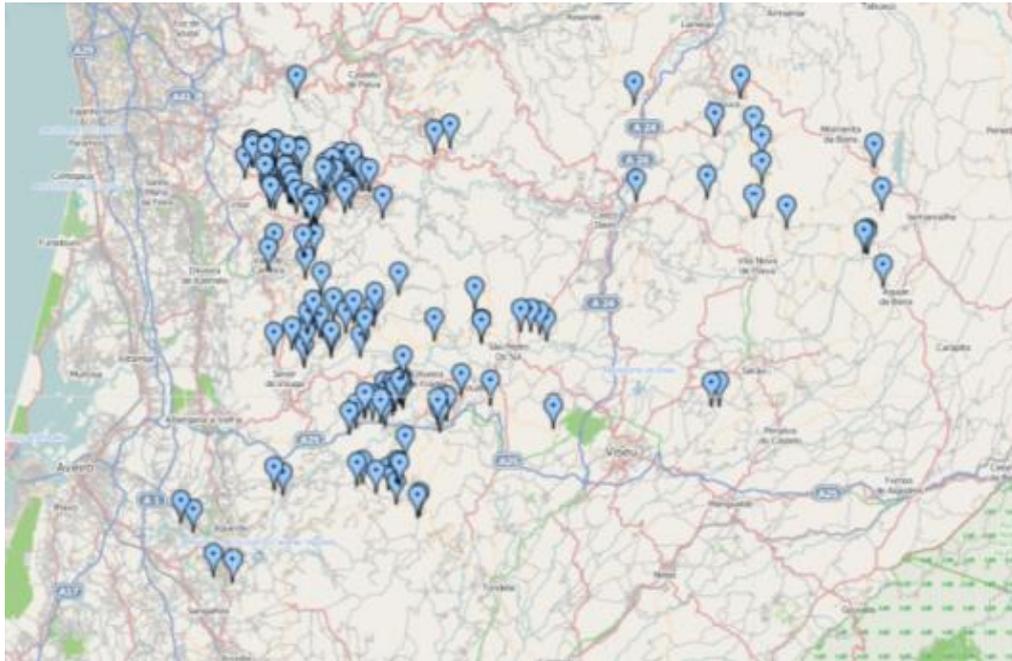


Ilustração 6 - Distribuição geográfica de clientes Zona 1

A zona 2 (litoral) totaliza 290 clientes distribuídos geograficamente da seguinte forma:

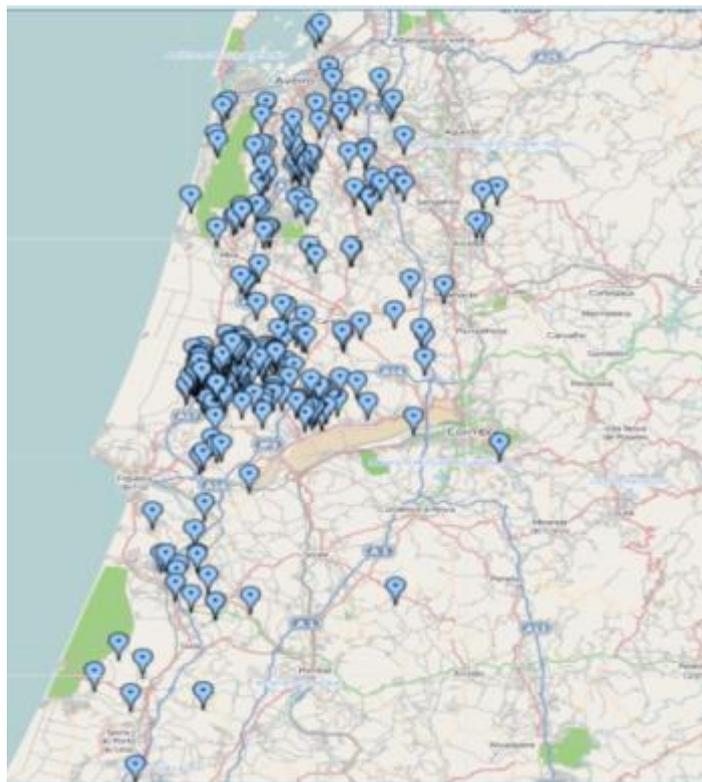


Ilustração 7 - Distribuição geográfica de clientes Zona 2

A zona 3 (Centro-Sul) totaliza 43 clientes distribuídos geograficamente da seguinte forma:

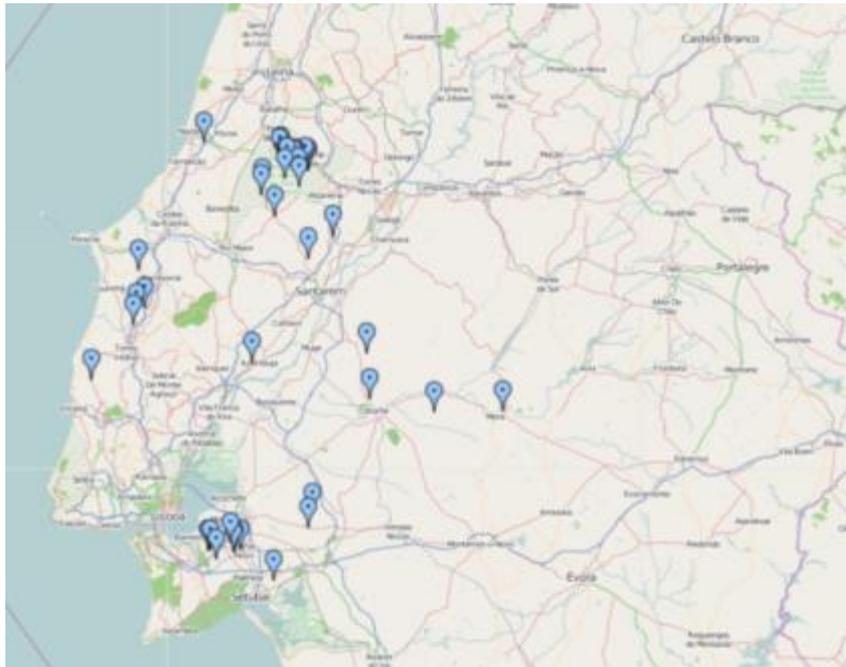


Ilustração 8 - Distribuição geográfica de clientes Zona 3

A zona 4 (Sul) totaliza 5 clientes distribuídos geograficamente da seguinte forma:

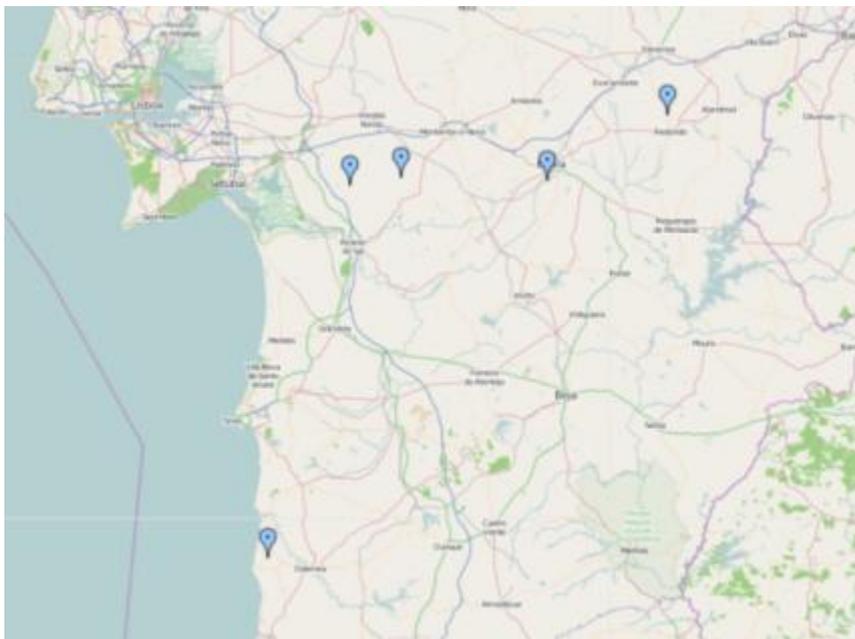


Ilustração 9 - Distribuição geográfica de clientes Zona 4

3.3.2 - Especificidades da recolha de leite

A recolha de leite é efectuada de acordo com as quantidades disponíveis para recolha nos produtores, sendo que não é aconselhável para a manutenção da qualidade do leite que este prazo ultrapasse os dois dias. Um outro factor importante relaciona-se com a capacidade dos tanques de armazenamento dos produtores. Este aspecto influencia a frequência de visitas das viaturas aos locais de recolha, ou seja, se o tanque do produtor não tiver capacidade para armazenar dois dias de produção, as visitas têm de ter uma periodicidade diária. São penalizados todos os produtores que não têm capacidade de armazenamento para dois dias, excepto os grandes produtores, cuja produção de dois dias supera a capacidade de transporte do camião e também os produtores cuja recolha seja inferior a 100 L. Estas penalizações são aplicadas apenas quando a recolha é efectuada. A penalização é integrada no preço a pagar por litro de leite. Como o custo do produto recolhido não irá ser considerado no problema em estudo, e por motivos de reserva de informação interna da empresa, esta informação não será especificada.

A quantidade de leite produzida pelos produtores poderá variar ao longo do tempo. Essas variações são mais notórias nas mudanças de estação, verificando-se uma redução de cerca de 10% em períodos de tempo seco, quando comparado com as estações de tempo mais húmido. Em casos excepcionais, poderão ser observadas variações superiores quando, por exemplo, se verifica a venda ou compra de quota de produção e de animais, doenças ou partos.

Além disso, a qualidade do leite pode variar de produtor para produtor. Existem alguns produtores cujos animais produzem leite de melhor qualidade. A esse produto chamamos leite seleccionado (usado para produtos como o leite Matinal). Esses clientes são tratados de forma independente dos outros, sendo necessário seleccionar uma viatura para recolher a produção de um ou vários clientes. Desta forma, a recolha deste leite origina a construção de rotas distintas, sendo considerado como um cluster distinto. Refira-se porém, que o número de clientes com estas características é muito pequeno relativamente à totalidade dos clientes que integram o sistema, e não vão ser tratados neste problema.

Uma característica importante do processo de recolha do leite é o facto de este não poder ser colocado nas cisternas das viaturas acima dos 10° C. Como o leite proveniente dos animais é recolhido a uma temperatura superior a 30° C, tem de existir um tempo de arrefecimento dentro do tanque do produtor, para que a recolha se possa processar. É necessário portanto saber qual o horário de ordenha praticado pelos produtores, sabendo que o leite atinge a temperatura desejada se permanecer 1 hora e 30 minutos no tanque de arrefecimento. As ordenhas podem ser feitas duas ou três vezes ao dia, sendo que existe uma excepção num produtor, que tem um sistema automático de recolhas. Este sistema automático faz o leite passar numas turbinas, arrefecendo-o, permitindo que a recolha seja feita a qualquer hora do dia.

Para efeitos de avaliação do processo de recolha de leite foi, no âmbito deste estágio, lançado um inquérito aos produtores (ver Anexo 1). O questionário foi entregue e recolhido gentilmente pelos condutores dos veículos de recolha, tendo obtido uma percentagem de respostas de 72.94% (353 respostas em 484 clientes). O inquérito discriminou três níveis de janelas de recolha e duas periodicidades de recolha (bidiária ou tridiária).

Na tabela 2 apresenta-se um resumo estatístico das respostas obtidas no inquérito.

Número de Janelas de Recolha	Número de Clientes	% Clientes	Total de Produção diária	% Produção	Média de litros de produção diária	Máximo de Produção diária
24 Horas	1	0,20%	2020	0,53%	2020	2020
2	346	71.50%	211068	55,65%	610	8227
3	6	1,24%	40639	10,72%	6773	18293
Não Respondeu	131	27.06%	125515	33,10%	958	22838
	484	100,00%	379242	100,00%		

Tabela 2 - Resumo do inquérito aos produtores

De acordo com a tabela 2, podemos observar que a maioria dos clientes se mostraram disponíveis para responder a este inquérito. Logicamente, o grupo de produtores com mais janelas de recolha (aqueles que fazem mais ordenhas por dia,) são aqueles cuja média de produção diária é maior.

Podemos também referir que o maior volume de produção se encontra nos produtores que fazem duas ordenhas por dia embora produzam, em média, o valor diário mais baixo. Isto significa que a maior parte dos clientes da Lacticoop são pequenas explorações que, em conjunto, são as que produzem mais leite.

2 Ordenhas					
1ª Janela		2ª Janela		3ª Janela	
Média					
10h:09m	18h:03m	20h:38m	6h:52m		
Mínimo					
8h:00m	15h:00m	19h:00m	4h:00m		
Máximo					
15h:00m	18h:30m	2h:00m	8h:30m		
3 Ordenhas					
Média					
9h:45m	12h:55m	17h:33m	20h:20m	4h:40m	5h:30m
Mínimo					
7h:00m	11h:30m	16h:00m	17h:30m	20h:00m	6h:30m
Máximo					
13h:30m	14h:00m	20h:30m	22h:00m	4h:30m	6h:00m

Tabela 3 - Resumo das janelas de recolha

A tabela 3 indica-nos as janelas horárias onde a recolha pode ser feita. Os dados mencionados na tabela foram calculados posteriormente ao inquérito, usando a informação daí resultante. Aos horários de recolha indicados no questionário foram adicionados o tempo da ordenha (em média 1 hora) e o tempo de arrefecimento do leite no tanque (em média 1 hora e 30 minutos). Devido ao elevado número de respostas não foram apresentados os dados de todos os inquéritos, mas sim um resumo das janelas de recolha, calculando médias, mínimos e máximos para obter uma visão geral do problema.

De realçar que apenas é necessário respeitar uma das janelas de recolha, pois nenhum dos clientes tem uma produção superior à capacidade do maior camião cisterna. Nesse sentido, e por

motivos de eficiência operacional, a empresa adoptou a política de uma recolha diária única por produtor elegível (com leite para recolha).

Os dados apresentados na tabela estão expostos e ordenados consoante o ponto de vista da maioria dos produtores, que preferem efectuar a primeira recolha de manhã, e não a de madrugada.

Verificamos nesta tabela que a primeira ordenha é feita de manhã, ficando o leite pronto para recolha (em média) a partir das 10h:09m, no caso de 2 ordenhas, e a partir das 9h:45m, no caso das 3 ordenhas.

No caso de o produtor fazer 2 ordenhas, a segunda é feita a partir das 19 horas e em média às 20h:38m.

No caso das 3 ordenhas, verifica-se que a segunda ordenha é feita mais cedo do que no caso anteriormente descrito, de forma a garantir que a terceira ordenha se possa realizar no mesmo dia.

Com estes dados em arquivo, a empresa poderá negociar com os produtores as novas janelas temporais de recolha. Este processo irá também diminuir o custo com as rotas, bem como as despesas com horários nocturnos dos condutores das viaturas de recolha sempre que possível.

Em consequência dos resultados observados, e não havendo, de momento, consenso sobre janelas de tempo admissíveis para satisfazer todos os produtores, optou-se no presente trabalho por considerar que a empresa propõe as janelas de tempo para as recolhas, obrigando os produtores a um agendamento adequado das ordenhas e consequente arrefecimento do leite. Esta prática poderá obrigar a mudanças de hábitos em alguns produtores, algo que não é, em geral, muito bem aceite. A possibilidade poder controlar as janelas de tempo de recolha em cada produtor, ajuda a promover a redução de custos anteriormente referida. Porém, o contrário (a obrigação de integrar as rotas em janelas de tempo definidas pelos produtores) promoveria um agravamento dos custos globais de transporte.

3.4 -Veículos

A potência das bombas de vácuo dos camiões cisterna influencia o tempo de recolha. Quanto maior a capacidade da bomba de vácuo, menor o tempo despendido para efectuar a recolha. Em alguns casos, sem a presença de alguns veículos com bombas de extracção de leite de maior capacidade, seria impossível respeitar as restrições de tempo do modelo.

A frota de veículos tem uma capacidade máxima de transporte, limitada legalmente, e explicitada no Anexo 2 na coluna "Capacidade real". A empresa dispõe de uma frota de 35 camiões cisterna.

Os semi-reboques são atrelados sempre ao mesmo tractor, sendo considerado um veículo único.

A dimensão de algumas explorações agrícolas não permite a recolha por parte de camiões com mais de dois eixos. Como tal, foi pedido aos condutores que fizessem um levantamento de quais os pontos de recolha que não permitem a entrada de viaturas com essas características (3 ou 4 eixos).

Os veículos da empresa Lacticoop são divididos por compartimentos que servem para a recolha selectiva de leite (leite de diferente qualidade não pode ser misturado). Esta característica é muito útil para o caso de haver alguma deterioração do leite recolhido. No entanto, e por ser um produto tão delicado, antes de recolher todo o leite presente nos depósitos dos clientes/produtores é retirada uma amostra que é entregue na fábrica antes da descarga do leite. Se o leite não estiver em condições ideais, o produtor pode ser responsabilizado pelo dano causado a todo o leite contido no nesse compartimento.

Os veículos da frota, segundo dados fornecidos pela empresa, têm um custo de 0,70 € por Km. Neste custo estão incluídos médias de consumo, seguros, impostos, portagens e amortizações das viaturas (por quilómetro).

3.5 - Condutores

O transporte é assegurado por 53 motoristas. De acordo com o Regulamento da Comunidade Europeia nº 561/2006 do Parlamento Europeu e do conselho de 15 de Março de 2006, artigo nº 7, os condutores não podem conduzir mais de 4 horas e 30 minutos continuamente, 9 horas por dia, 56 horas em 6 dias e 90 horas em 14 dias. As pausas de condução (após 4 horas e 30 minutos de condução) são obrigatoriamente de 45 minutos ou de 15 minutos + 30 minutos (durante a viagem e obrigatoriamente por esta ordem). Após 6 horas de condução e até 9 horas apenas são permitidos períodos de pausa de 30 ou 45 minutos. A jornada de serviço não pode ultrapassar as 13 horas.

3.6 - Rotas

Cada rota tem associada uma viatura com determinada capacidade, sendo posteriormente seleccionado um condutor disponível para efectuar essa rota. Iremos assumir que o número de condutores é suficiente para assegurar todas as rotas determinadas, atendendo que cada condutor pode, dentro da sua jornada diária de trabalho, realizar mais do que uma rota. Nesse sentido, o problema não irá incidir na afectação de condutores às rotas, conjugado com a regulamentação anteriormente exposta, relativamente aos mecanismos que regulam a profissão.

Depois da recolha, a matéria-prima é entregue nas fábricas de lacticínios Lactogal (Litoral-Tocha e Norte-Oliveira de Azeméis), Danone (Alpiarça, na região de Santarém) e Parmalat (Sul). Depois de completada esta fase, o veículo regressa à origem (estacionamento respectivo). De facto, as rotas são iniciadas e concluídas no mesmo ponto (o estacionamento), no entanto o problema foi tratado como se o ponto terminal fosse o depósito.

Nesse sentido podemos considerar que o limite de tempo de condução (T_k) é de 270 Min, assumindo que, ao chegar ao depósito, os três factores relativos aos tempos de descarga de matéria-prima (ponto 3.1 - Estacionamentos e Depósitos) são suficientes para o condutor descansar os 45 minutos previstos por lei, e poder regressar ao estacionamento sem infringir a lei. Salvo raras excepções (nesses casos os condutores esperam na fábrica até completarem o tempo de descanso), estes tempos de descarga têm uma duração suficientemente grande para atingir os 45 minutos de descanso obrigatório, antes de começar outra rota.

Um breve resumo das rotas utilizadas actualmente pela empresa, para recolher diariamente a matéria-prima existente nos clientes da Zona 1 (durante o primeiro semestre de 2011), está representado no Anexo 4 – “Distâncias percorridas”

Tal como referido anteriormente, as rotas de recolha são mantidas durante períodos longos de tempo, não sendo actualizadas quando ocorrem modificações nos parâmetros de recolha, pelo facto do processo de construção dessas rotas ser bastante complexo. Essas rotas são calculadas intuitivamente com base na experiência adquirida pelo responsável por esta tarefa.

Rotas Originais			
Zona	Distância (Mt)	Volume de carga (L)	Nº Clientes
1 Total	1717012	53361	146
2 Total	2297687	167859	290
3 Total	1962159	138580	36
4 Total	574966	19461	11
Total Geral	6355830	379261 (*)	484

Tabela 4 - Resumo das rotas existentes na empresa

A tabela 4 mostra a distribuição de distâncias percorridas, volume de carga e número de clientes por cada zona\cluster existente na empresa. O valor total das distâncias percorridas vai ser utilizado mais à frente neste trabalho, servindo como valor de referência para comparação com os resultados obtidos.

3.7 - Alocação de clientes aos depósitos

A alocação dos clientes aos depósitos que actualmente vigora na empresa, foi desenhada pelo gestor da frota da Lacticoop (capítulo 3.3.1- “Distribuição geográfica dos clientes”). Esta é uma matéria muito sensível porque determina quais os clientes que vão satisfazer a procura da fábrica correspondente, definindo um cluster (que é otimizado autonomamente). Atendendo à relevância deste ponto, foi integrado no presente trabalho um modelo de optimização que permite automatizar o processo de reconfiguração da alocação de clientes aos depósitos/fábricas, podendo dessa forma gerar novas configurações de clusters. Os dados utilizados para este modelo foram:

- As quantidades disponíveis para recolha nos produtores/clientes;
- As quantidades de matéria-prima requeridas em cada depósito/fábrica;
- As distâncias entre cada produtor/cliente e as fábricas;
- As distâncias entre cada produtor/cliente e os estacionamento;

O modelo procura afectar os clientes aos depósitos/fábricas, de forma a satisfazer os níveis de procura requeridos nos mesmos (com um erro de 10%), minimizando a soma total das distâncias entre os produtores/clientes e os depósitos/fábricas e estacionamento.

4 - Construção de rotas

4.1 - Breve revisão da literatura

4.1.1 - O problema de alocação de clientes aos depósitos

O problema de alocação proposta pode ser visto como um problema de afectação de clientes a depósitos fixos, satisfazendo restrições de capacidade mínimas e máximas em cada um dos 4 depósitos, admitindo uma margem de erro de 10%. O objectivo do problema é a minimização da soma total das distâncias entre os produtores/clientes e os depósitos/fábricas. A resolução deste problema deve anteceder a resolução do problema de construção das rotas, sempre que haja alterações significativas nas quantidades a recolher nos produtores/clientes, ou nas quantidades requeridas pelos depósitos/fábricas.

Este problema é semelhante a um problema de localização, sem custos fixos nos depósitos, com depósitos fixos e em funcionamento e com limites de capacidade mínimos e máximos nos volumes de carga a satisfazer nos depósitos (Wolsey 2008).

4.1.2 - O Vehicle Routing Problem

Dantzig & Ramser, em 1959, introduziram o problema *Vehicle Routing Problem* (VRP) (Dantzig & Ramser (1959)). Este problema tem como objectivo a determinação do melhor conjunto de rotas a serem realizados por uma frota de veículos, para servir um determinado conjunto de clientes. Em Dantzig & Ramser (1959) foi proposta a primeira formulação matemática e o primeiro algoritmo para

resolver o VRP. Essa abordagem foi aplicada a um problema de entrega de gasolina em estações de serviço.

Este interesse no VRP é motivado pela sua relevância prática e pela respectiva dificuldade de resolução óptima. Em 2002, Toth & Vigo referiram que, “o interesse no VRP é motivado pela sua relevância prática e a sua dificuldade considerável de implementação: as maiores instâncias de VRP que podem ser consistentemente resolvidas pelos algoritmos exactos mais eficientes existentes no momento contêm 50 clientes, sendo que problemas maiores podem ser resolvidos optimamente apenas em casos particulares” (Toth & Vigo (2001)). Devido a estas limitações, muitos dos problemas reais envolvendo a construção de rotas de veículos têm sido abordados utilizando algoritmos aproximativos como heurísticas e metaheurísticas. Uma das primeiras heurísticas para o VRP foi proposta em 1964 por Clarke e Wright (Clarke & Wright (1964)). Esta heurística permitia melhorar a abordagem de Dantzig-Ramser, estando actualmente na base de muitas das mais eficientes metaheurísticas propostas para o VRP na literatura. No presente trabalho, será desenvolvido uma heurística para o problema concreto da empresa Lacticoop, o qual também se baseou na heurística de Clarke & Wright.

Os problemas de rotas de veículos são habitualmente tratados por algoritmos aproximativos e/ou métodos exactos. Tratando-se de um problema pertencente à classe dos NP-difíceis, a utilização de algoritmos exactos requer um esforço computacional elevado, que em geral, e de uma forma breve, cresce exponencialmente com a dimensão do problema. Para a maioria deste tipo de problemas são toleráveis, e até muitas vezes desejáveis, soluções aproximadas que sejam suficientemente precisas e obtidas num período de tempo considerado aceitável, sendo para estes casos invocados os algoritmos, métodos heurísticos ou metaheurísticos.

Dada a grande abrangência de problemas deste tipo, têm sido estudadas diversas variações, ou casos particulares de VRP. Estas variações estão associadas com os vários tipos de restrições que são vulgares na transposição para a prática deste tipo de problemas. Alguns desses problemas específicos que derivam do VRP são brevemente apresentados de seguida.

1. Capacitated VRP (CVRP)

O CVRP é “o membro mais simples e mais estudado” (Toth & Vigo 2001) dos VRP. No CVRP, cada veículo da frota tem uma capacidade limitada e uniforme, ou seja, de tamanho fixo, encomendas conhecidas de uma só mercadoria e a existência de um único depósito. O seu objectivo é “minimizar o custo total de serviço a todos os clientes” (Toth & Vigo 2001).

2. VRP with Time Windows (VRPTW).

Toth & Vigo definem o “VRPTW” como sendo uma extensão do CVRP com o acréscimo do intervalo de tempo associado a cada cliente.

3. VRP with Backhauls (VRPB)

Esta é variante de VRP que permite a recolha e entrega de material. Sobre este tipo de VRP, Toth & Vigo afirmam que “as restrições associadas às operações de carga e descarga, e a dificuldade de rearranjo da carga do veículo durante a rota, significam que todas as entregas devem ser realizadas antes das recolhas” (Bianchessi & Righini 2007).

4. Multiple Depot VRP (MDVRP)

O “Multiple Depot VRP” é a “generalização do VRP (onde existe apenas um depósito), onde os múltiplos veículos existentes partem de diferentes depósitos, e voltam para os seus depósitos originais no final das rotas que lhe foram atribuídas” (Carlsson et al. 2007).

5. VRP with Pick-up and Delivery (VRPPD)

Esta é variante de VRP que permite a recolha e entrega de material. A primeira abordagem mostra-nos muitas semelhanças entre o “VRP with Pick-up and Delivery” e o “VRP with Backhauls”, problema onde também existia distribuição e recolha de bens. No entanto, no VRPB os veículos devem realizar todas as entregas antes de iniciar as recolhas, sendo que no VRPPD não existe esta restrição, ou seja, podem existir recolhas antes de todas as encomendas estarem entregues o que, pelo

raciocínio induzido por Toth & Vigo na análise do VRPB, produzirá um problema de resolução mais difícil no caso do VRPPD.

4.1.3 – O Algoritmo de 2ª Ordem

O algoritmo de 2ª ordem descrito em (Karnaugh 1976), também conhecido por estratégia de antecipação (look-ahead), foi aplicado ao problema de árvores de suporte de custo mínimo com restrição de capacidade no número de nodos em cada subárvore incidente no nodo raiz. No presente trabalho, o algoritmo de 2ª Ordem foi adaptado para o VRP. Esta técnica integra a classe de algoritmos de pesquisa local. Não se tratando de uma metaheurística, contém muitas das propriedades destas, como a simplicidade, a robustez e a sua fácil implementação. Existem na literatura técnicas de pesquisa local repetitivas (Iterated Local Search) dedicadas a problemas de rotas de veículos, nomeadamente em Lourenço et al. (2003), Bianchi et al. (2006), Ibaraki et al. (2008) e Chen et al. (2010). O algoritmo de 2ª Ordem que será utilizado no presente trabalho pode ser visto como um caso particular do “Iterated local search” (Lourenço et al. (2003)). Tal como evidenciaremos nos testes computacionais que irão ser realizados, os resultados da aplicação do algoritmo de 2ª Ordem ao caso concreto da empresa em estudo são bastante interessantes, quando comparados com as soluções óptimas obtidas com técnicas exactas (soluções da formulação a propor na secção 4.3). Refira-se porém que os resultados computacionais obtidos pelos investigadores que usaram o algoritmo de pesquisa local repetitivo (Lourenço et al. (2003)) para resolver o VRP são bastante encorajadores, quando aplicados a instâncias de *benchmark*.

4.2 - Formulação para o problema de alocação de clientes aos depósitos

O problema de alocação de clientes aos depósitos deve ser resolvido previamente à resolução do problema de construção das rotas. A sua solução deve definir novas propostas de agrupamento dos clientes nos 4 clusters em análise.

Nesta secção propõe-se uma formulação para o problema de alocação enunciado. Essa formulação foi adaptada de Klose & Drexl (2005).

Índices:

m = Número total de clientes;

i = Clientes; $i = 1, \dots, m$;

j = Depósitos; $j = 1, \dots, 4$;

Parâmetros

d_{i0} = Distância entre o cliente i e o depósito;

e_{i0} = Distância entre o cliente i e o estacionamento;

q_i = Produção do cliente i ;

Q_j = Procura no depósito j ;

Variáveis:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o produtor } i \text{ está associado ao depósito } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, 4$$

Formulação:

Min

$$z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^4 (d_{i0} + e_{i0}) x_{ij}$$

Na função objectivo pretende-se minimizar a soma das distâncias entre os clientes e os depósitos, e das distâncias entre os clientes e os estacionamentos.

Restrições:

Restrições de semi-afecção, que, juntamente com as restrições de integridades, garantem que cada cliente está ligado a um único depósito.

$$\sum_{j=1}^4 x_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

Restrições de capacidade mínima, que garantem que a procura no depósito j é satisfeita em pelo menos 90%.

$$\sum_{j=1}^4 x_{ij} q_i \geq 0,90Q_j, \quad i = 1, \dots, m \quad (2)$$

Restrições de capacidade, que garantem que a procura no depósito j é satisfeita, no máximo a 110%.

$$\sum_{j=1}^4 x_{ij} q_i \leq 1,10Q_j, \quad i = 1, \dots, m \quad (3)$$

4.3 - Formulação para a Metodologia exacta

Nesta secção será apresentada uma formulação linear inteira mista para o problema de rotas de veículos proposta no presente trabalho. As soluções óptimas desta formulação fornecem soluções exactas para o problema em estudo. A construção da formulação foi desenvolvida utilizando o *software* Eclipse Java EE IDE for Web Developers, Versão Juno. O solver utilizado para a resolução do modelo matemático foi o *lp_solve* 5.5 (biblioteca do Java).

O *lp_solve* é um *software open source*, disponibilizado em:

- <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/distribution.htm>

Permite resolver formulações em programação linear e linear inteiras.

ED seguida apresenta-se a formulação, adaptada de Bodin et al. (1983).

Índices:

- n: Número total de clientes de cada cluster;
- i,j: Clientes a visitar;
- m: Número total de veículos disponíveis;
- k: Veículo, $k=1, \dots, m$;
- i=0 (Estacionamento)

$j=0$ (Deposito)

Parâmetros:

Q_k : Capacidade do veículo k , $k=1, \dots, m$;

$$Q_k \in \mathbb{R}_0^+$$

q_i : Quantidade de leite para recolha no cliente i , (assume-se que $q_0=0$);

$$q_i \in \mathbb{R}_0^+$$

d_{ij} : Distância entre i e j , $i, j=0, \dots, n$ e $i \neq j$;

$$d_{ij} \in \mathbb{R}_0^+$$

Ne_k =Número de eixos do veículo k , $k=1, \dots, m$;

$$Ne_k \in [2,4];$$

NMe_i =Número máximo de eixos permitido no cliente i , $i=1, \dots, n$;

$$NMe_i \in [2,4]$$

t_{ij}^k : Tempo de viagem entre o cliente i e j quando efectuado pelo veículo k , $i, j=0, \dots, n$, $k=1, \dots, m$;

$$t_{ij}^k \in \mathbb{R}_0^+;$$

Cb_k : Capacidade da bomba do veículo k , em litros por minuto, $k=1, \dots, m$;

$$Cb_k \in \mathbb{R}_0^+$$

t_i^k : Tempo de carga no cliente i = $\frac{q_i}{Cb_k}$;

$$t_i^k \in \mathbb{R}_0^+$$

T_k = Tempo máximo de condução no veículo k , $k=1, \dots, m$;

$$T = 270 \text{ Min}$$

Variáveis de decisão:

y_{ij} : quantidade de fluxo que atravessa o arco (i,j) , $i, j=0, \dots, n$ e $i \neq j$;

$$y_{ij} \in \mathbb{R}_0^+$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o veículo } k \text{ viaja de } i \text{ para } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad i, j=0, \dots, n, \quad k=1, \dots, m$$

Formulação:

Min

$$z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m d_{ij} x_{ij}^k$$

Função objectivo que minimiza a soma das distâncias percorridas em todas as rotas determinadas

Restrições:

Restrições de semi-afectação. Garantem que a cada cliente j chega uma única rota e um único veículo k .

$$\sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^m x_{ij}^k = 1, \quad j = 1, \dots, n \quad (1)$$

Restrições de semi-afectação. Garantem que de cada cliente i sai uma única rota e um único veículo.

$$\sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m x_{ij}^k = 1, \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

Restrições que garantem que de cada cliente chega e sai exactamente o mesmo veículo.

$$\sum_{i=0}^n x_{il}^k - \sum_{j=0}^n x_{ij}^k = 0, \quad k = 1, \dots, m, l = 1, \dots, n \quad (3)$$

Restrições de conservação de fluxo. Estabelecem que a diferença entre o fluxo de mercadoria que sai do cliente i menos a mercadoria que lhe chegou, corresponde exactamente à mercadoria carregada nesse cliente.

$$-\sum_{i=0}^n y_{ij} + \sum_{i=0}^n y_{ji} = q_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (4)$$

Restrições de ligação entre as variáveis topológicas (x_{ij}^k) e as variáveis de fluxo (y_{ij}), limitando superiormente o fluxo que atravessa cada arco usado nas rotas. Estas restrições garantem também o limite de capacidade do veículo k que está a realizar essa rota.

$$y_{ij} \leq \sum_{k=1}^m (Q_k - q_j) x_{ij}^k, \quad i, j = 1, \dots, n, i \neq j \text{ (com } q_0 = 0) \quad (5)$$

Restrições de ligação entre as variáveis topológicas (x_{ij}^k) e as variáveis de fluxo (y_{ij}), limitando inferiormente o fluxo que atravessa cada arco usado nas rotas.

$$y_{ij} \geq \sum_{k=1}^m q_i x_{ij}^k, \quad i, j = 0, \dots, n, i \neq j \text{ (com } q_0 = 0) \quad (6)$$

Restrições que garantem que os limites máximos de tempo para cada veículo (rota) são cumpridos.

$$\sum_{i=1}^n t_i^k \sum_{j=0}^n x_{ij}^k + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n t_{ij}^k x_{ij}^k \leq T_k, \quad k = 1, \dots, m \quad (7)$$

Para simplificar a indexação da formulação não foram eliminadas algumas variáveis que não deverão constar no modelo. Assim, deverão ser eliminadas da formulação as seguintes variáveis:

- Todas as variáveis x_{ij}^k e y_{ij} , para todo $i=0,1,\dots,n$.
- Todas as variáveis x_{ij}^k tais que $q_i + q_j < Q_k$, ou seja, sempre que a produção do cliente i somada à produção do cliente j seja inferior à capacidade do veículo k .
- Todas as variáveis x_{ij}^k tais que $N_{e_k} \geq N_{m_i}$ ou $N_{e_k} \geq N_{m_j}$, ou seja, sempre que a viatura k não puder visitar o cliente i ou j . Isto acontece devido à pequena dimensão de algumas explorações agrícolas (clientes), que não permitem a entrada de veículos com grandes dimensões.
- Todas as variáveis x_{ij}^k tais que $t_i^k + t_{ij}^k \geq T_k$, ou seja, sempre que o tempo de viagem entre o cliente i e o cliente j , somado ao tempo de carga no cliente i , quando processado pelo veículo k , seja superior ao limite máximo de tempo T_k .

4.4 - A Heurística de Clarke & Wright

O algoritmo de Clarke & Wright é uma das heurísticas mais conhecidas para construção de rotas de veículos. Este algoritmo foi proposto em 1964 por G. Clarke e J. Wright (Clarke & Wright 1964). Trata-se de uma heurística primal baseada num procedimento construtivo de agregação de rotas, com as quais procura efectuar as maiores poupanças (savings).

Tratando-se de uma heurística, a heurística de Clarke & Wright não garante uma solução óptima, porém oferece uma solução interessante e que pode ser obtida de forma rápida, podendo, dessa forma, integrar um algoritmo melhorativo ou uma metaheurística.

O conceito de poupanças anteriormente referido expressa a redução nos custos que se consegue obter através da junção de duas rotas, conforme apresentado na figura abaixo, sendo que 0 representa o depósito e i e j representam clientes.

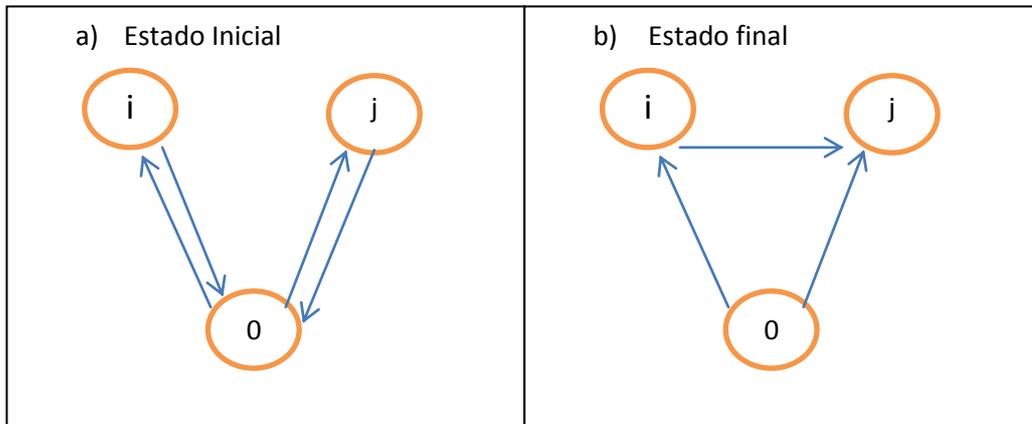


Ilustração 10 – Conceito de Poupanças

O custo associado às duas rotas associada à representação a), seria:

$$\text{Custo (a)} = c_{0i} + c_{i0} + c_{0j} + c_{j0}$$

O custo associado à versão agregada das duas rotas, representada em b), seria:

$$\text{Custo (b)} = c_{0i} + c_{ij} + c_{j0}$$

Nestas circunstâncias, a poupança que se obteria substituindo a versão b) pela a) é descrita por:

$$\text{Poupança (P)} = \text{Custo (a)} - \text{Custo (b)}$$

$$P_{ij} = c_{0i} + c_{i0} + c_{0j} + c_{j0} - (c_{0i} + c_{ij} + c_{j0})$$

$$P_{ij} = c_{i0} + c_{j0} - c_{ij}$$

Transpondo este conceito para o nosso exemplo, com pontos de partida (0 - Estacionamento) e chegada (1- Depósito) distintos:

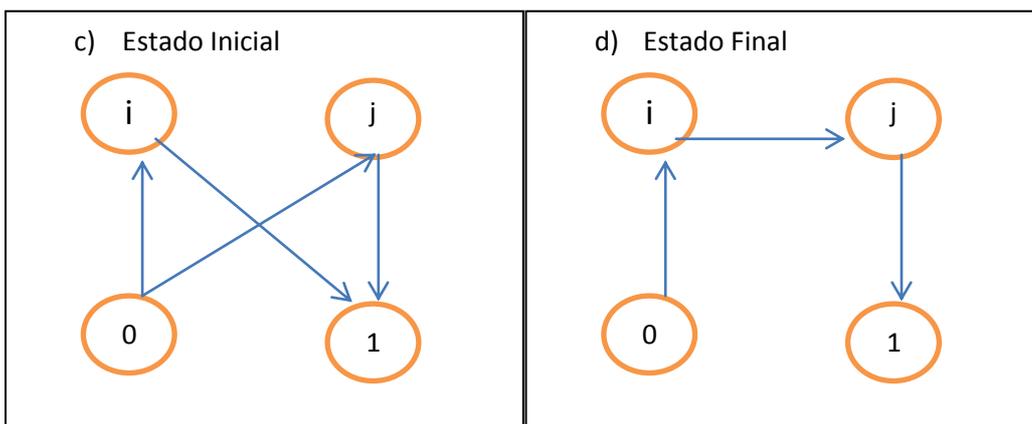


Ilustração 11 – Conceito de Poupanças com ponto de origem e de chegada distintos

O custo associado às duas rotas representadas em c), seria:

$$\text{Custo (c)} = c_{0i} + c_{i1} + c_{0j} + c_{j1}$$

O custo associado à versão agregadas das duas rotas, representado em d), seria:

$$\text{Custo (d)} = c_{0i} + c_{ij} + c_{j1}$$

Pelo que as poupanças combinadas por fazer apenas a rota (b) seriam:

Poupança (P) = Custo (c) – Custo (d)

$$P_{ij} = c_{0i} + c_{i1} + c_{0j} + c_{j1} - (c_{0i} + c_{ij} + c_{j1})$$

$$P_{ij} = c_{i1} + c_{0j} - c_{ij}$$

Além da rapidez em termos de tempo de processamento, a heurística de CW apresenta algumas das qualidades associadas a um aplicativo comercial genérico: robustez, ou seja, capacidade de resolver satisfatoriamente problemas com diferentes restrições e rapidez de processamento. A qualidade das soluções geradas pelo algoritmo poderá ser sensível a alterações na estrutura do problema, nomeadamente, decorrentes da introdução de restrições adicionais.

Usando o conceito de poupanças anteriormente referido, o algoritmo começa por ordenar, por ordem decrescente, as poupanças calculadas, passando depois para um procedimento iterativo de tentativa de agregação de rotas, seguindo a referida lista ordenada. Desta forma, procurar-se-á, em cada iteração, juntar duas rotas ligando os nodos candidatos i e j, caso seja possível e admissível. O algoritmo termina quando encontrar a primeira ligação com valor $p_{ij} \leq 0$ ou quando a lista tiver sido totalmente percorrida. Na tabela 5 apresenta-se, a título de exemplo, a lista ordenada de poupanças relativas aos clientes da Zona 4. Na ilustração 12 apresenta-se um fluxograma da heurística de Clarke & Wright que foi adaptado para resolver o problema concreto em estudo no presente trabalho.

Código Cliente i	Código Cliente j	P_{ij}
3603501	3688535	172038
3659512	3688535	90572
3603501	3659512	88297
3659512	3672520	75948
3659510	3659512	43927
3659510	3672520	39148
3603501	3659510	37078
3659510	3688535	35354
3672520	3688535	13605
3603501	3672520	13320

Tabela 5 - Tabela "Savings" - Zona 4

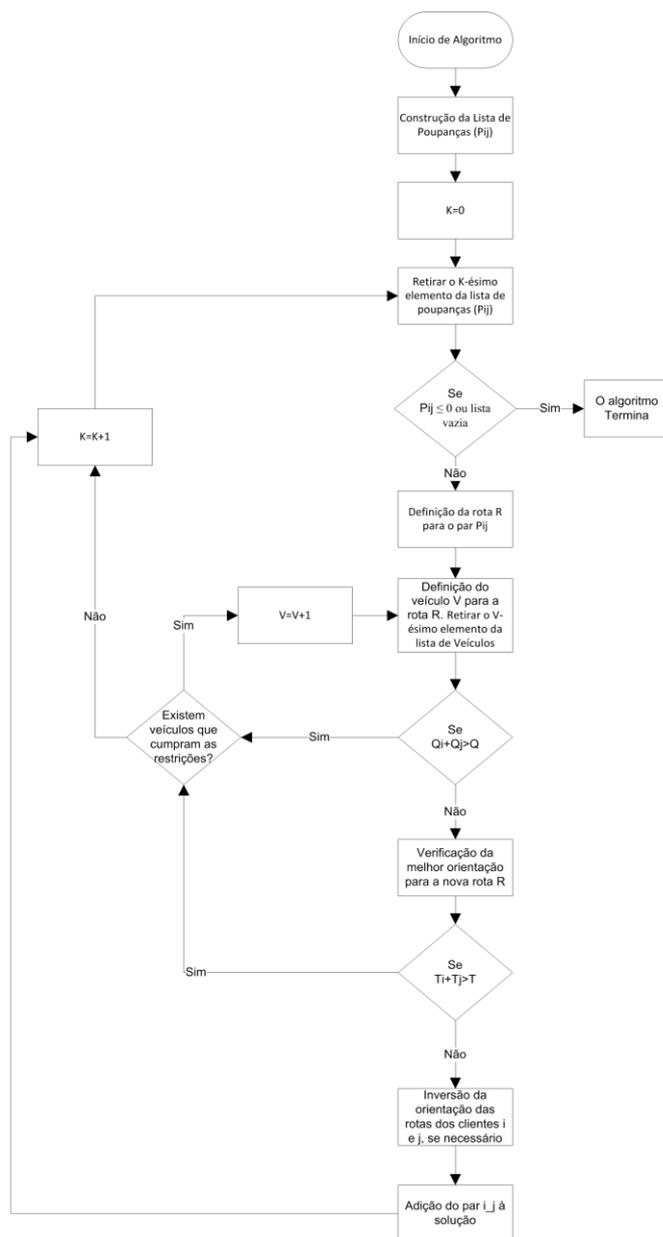


Ilustração 12 - Fluxograma da Heurística de Clarke & Wright

A ilustração 12 mostra-nos alguns aspectos particulares da implementação da heurística de Clarke & Wright. O algoritmo inicia-se com a leitura de dados de *input* e construção da lista de poupanças. É retirado o primeiro elemento desta lista de poupanças, inicializando-se o contador de iterações k (inicialmente $k=0$). Cada elemento da lista de poupanças propõe a junção de duas rotas, ligadas pelos dos nodos associados à poupança em análise. O algoritmo testa a admissibilidade desta ligação, efectivando-a ou rejeitando-a. De seguida incrementa o contador de iterações k e escolhe a próxima poupança da lista. O algoritmo termina quando todos os elementos da lista forem percorridos ou quando o valor da poupança P_{ij} for menor que 0, ou após aceitar a $(n-1)$ -ésima junção de rotas (caso em que a rota seria única).

Em cada tentativa para junção de rotas são realizados os seguintes testes de admissibilidade:

1. Escolha adequada de veículo: é escolhido o primeiro veículo livre (inicialmente $V=1$) da lista de veículos e verifica se este tem capacidade (Q_V) para efectuar esta rota (Q_R):
 - a. Se $Q_R \leq Q_V$, avança para o ponto 2.
 - b. Se $Q_R > Q_V$ procura um novo veículo ($V=V+1$) tal que $Q_R \leq Q_V$, até percorrer toda a lista de veículos “livres”.
 - i. Se para todos os veículos “livres” de manter $Q_R > Q_V$, volta ao ponto 1, incrementando o contado de iterações K (i.e., fazendo $K=K+1$)
 - ii. Caso contrário, avança para o ponto 2.
2. Verificação da melhor orientação da rota:
 - a. Verifica os extremos da rota.
 - b. Calcula a distância entre os extremos e o depósito e o estacionamento do cluster em causa.
 - c. Verifica qual a menor distância das duas opções (Estacionamento_extremo1 + extremo2_Depósito ou Estacionamento_extremo2 + extremo1_Depósito) e define a melhor orientação das rotas.
3. Verificação da restrição de tempo (T): os tempos de cada rota podem ser divididos em três conjuntos: tempo de viagem (igual para todos os veículos)= T_a ; tempo de carga (variável dependendo do veículo, devido à capacidade da bomba de extracção de cada um deles)= T_c ; tempo total (T_a+T_c)= T_t .
 - a. Se $T_a \geq T$ volta para o ponto 1, após incrementar o contador K .
 - b. Se $T_a < T$:
 - i. Se $T_t \leq T$, avança para o ponto 5.
 - ii. Se $T_t > T$, procura um veículo “livre” com uma bomba de extracção de maior capacidade, tal que $Q_R \leq Q_V$ e $T_t \leq T$.
 - i. Se $T_t \leq T$, avança para o ponto 4.
 - ii. Se $T_t > T$, volta ao ponto 1, após incrementar o contador K .
4. Se for necessário, inverte a rota e avança para o ponto 5, caso contrário, avança directamente para o ponto 5.
5. Adiciona o par à rota e regressa ao ponto 1, após incrementar o contador K .

4.5 – O Algoritmo de 2ª Ordem

Um procedimento de pesquisa local para o problema em análise no presente trabalho, pode ser descrito baseado no algoritmo de 2ª Ordem proposto por Karanagh (1976), e descrito em Martins (2007). Os passos principais desse algoritmo descrevem-se de seguida:

Partindo de uma solução s_0 gerada pela heurística de Clarke & Wright, considerando o conjunto U de arestas inibidas vazia e o contador de iterações k , na primeira iteração repete-se a execução do algoritmo CW inibindo a inclusão de cada uma das arestas presentes em s_0 (inibindo a admissão da respectiva poupança na lista de poupanças ($P_{ij}=0$)). Escolhe a melhor dessas soluções, conduzindo à solução s_k e inclui a aresta inibida no conjunto U . Na iteração seguinte volta-se a executar a heurística de Clarke & Wright inibindo a inclusão de cada uma das arestas presentes na solução s_k , e das arestas presentes no conjunto U . Voltar a escolher a melhor dessas soluções, s_k , e incluir a respectiva aresta inibida no conjunto U . O procedimento repete-se iterativamente, acumulando em U todas as arestas seleccionadas para inibir. O algoritmo termina quando, numa dada iteração, a respectiva melhor solução tem custo superior à melhor solução da iteração anterior.

De seguida apresenta-se um pseudocódigo do algoritmo de 2ª Ordem considerado, adaptado do algoritmo descrito em Martins (2007):

U : o conjunto de arestas e $\in E$ inibidas;
 CW (U,s) : o algoritmo de Clarke & Wright considerando as arestas em U inibidas e devolvendo a solução s;
 z(s) : o custo total da solução s;
 E' : o conjunto de arestas na solução s;
 s* : representa a melhor solução corrente;

Algoritmo de Segunda Ordem (SO)

```

U ← ∅
Executar CW(U,s*);
Fazer k ← 0 , melhora ← true ;
Enquanto (melhora) fazer
    Seleccionar as arestas E' de s*;
    Para (cada e ∈ E') fazer
        Executar CW(U∪{e},s);
    Terminar_para;
    Seja {e'} a aresta que conduziu à solução com menor custo, seja s' essa solução;
    Se (z(s') ≤ z(s*))
        Então s* ← s', U ← U ∪ {e'} ;
        Senão melhora ← falso ;
    Terminar_se;
Terminar_enquanto;
Devolver a solução s* com mínimo local z(s*).
    
```

Ilustração 13 - Pseudocódigo do Algoritmo de 2ª ordem

5 - Resultados

Neste capítulo são apresentados todos os resultados dos problemas enunciados no ponto 4- “Construção de Rotas”. Para simplificar os títulos dos capítulos e as legendas das tabelas e das ilustrações, foi utilizada a seguinte terminologia para identificar as metodologias usadas:

- Algoritmo de 2ª Ordem – este algoritmo utiliza a heurística *greedy* de Clarke & Wright, quer para inicialização, quer para resolver cada subproblema ao longo da sua execução;
- Alocação Inicial – refere-se à alocação de clientes a depósitos em vigor na empresa, à data em que os dados de *input* foram recolhidos;
- Nova Alocação – refere-se à alocação de clientes a depósitos calculado de acordo com o referido no ponto 4.2;
- Clusters – Nova distribuição de clientes conforme as soluções descritas o ponto 5.1.1 (cluster 1), 5.1.2 (cluster 2), 5.1.3 (cluster 3) e 5.1.4 (cluster 4);

5.1 - A alocação de clientes aos depósitos

A minimização de distâncias relativamente ao problema de alocação de clientes resultou num valor de 33920018 Mt. Esta distância é o valor mínimo da soma das distâncias das combinações estacionamento->cliente->depósito para todos os clientes, depósitos e estacionamentos. Este problema com 1936 variáveis e 492 restrições atingiu a solução óptima em 0,094 segundos após 971 iterações, de acordo com tabela 6.

Objective: Minimize(R0)			
SUBMITTED			
Model size:	492 constraints,	1936 variables,	5808 non-zeros.
Sets:		0 GUB,	0 SOS.
Using DUAL simplex for phase 1 and PRIMAL simplex for phase 2. The primal and dual simplex pricing strategy set to 'Devex'.			
Relaxed solution	33896798.9111 after	767 iter	is B&B base.
Feasible solution	34037578 after	855 iter,	15 nodes (gap 0.4%)
Improved solution	34037511 after	867 iter,	24 nodes (gap 0.4%)
Improved solution	33978215 after	897 iter,	56 nodes (gap 0.2%)
Improved solution	33922480 after	914 iter,	70 nodes (gap 0.1%)
Improved solution	33920018 after	959 iter,	111 nodes (gap 0.1%)
Optimal solution	33920018 after	971 iter,	122 nodes (gap 0.1%).
Excellent numeric accuracy * = 1.11022e-016			
MEMO: lp_solve version 5.5.2.0 for 64 bit OS, with 64 bit REAL variables.			
In the total iteration count 971, 347 (35.7%) were bound flips.			
There were 64 refactorizations, 0 triggered by time and 2 by density.			
... on average 9.8 major pivots per refactorization.			
The largest [LUSOL v2.2.1.0] fact(B) had 1951 NZ entries, 1.0x largest basis.			
The maximum B&B level was 13, 0.0x MIP order, 7 at the optimal solution.			
The constraint matrix inf-norm is 22838, with a dynamic range of 22838.			
Time to load data was 0.010 seconds, presolve used 0.002 seconds,			
... 0.082 seconds in simplex solver, in total 0.094 seconds.			

Tabela 6 - Análise de sensibilidade – Alocação

Seguidamente, estão representados os novos clusters de clientes para cada depósito e estacionamento, comparativamente aos clusters originais (já existentes na empresa). No capítulo 5.5, estão calculadas as novas rotas para os novos clusters.

5.1.1 - Zona1/Cluster 1

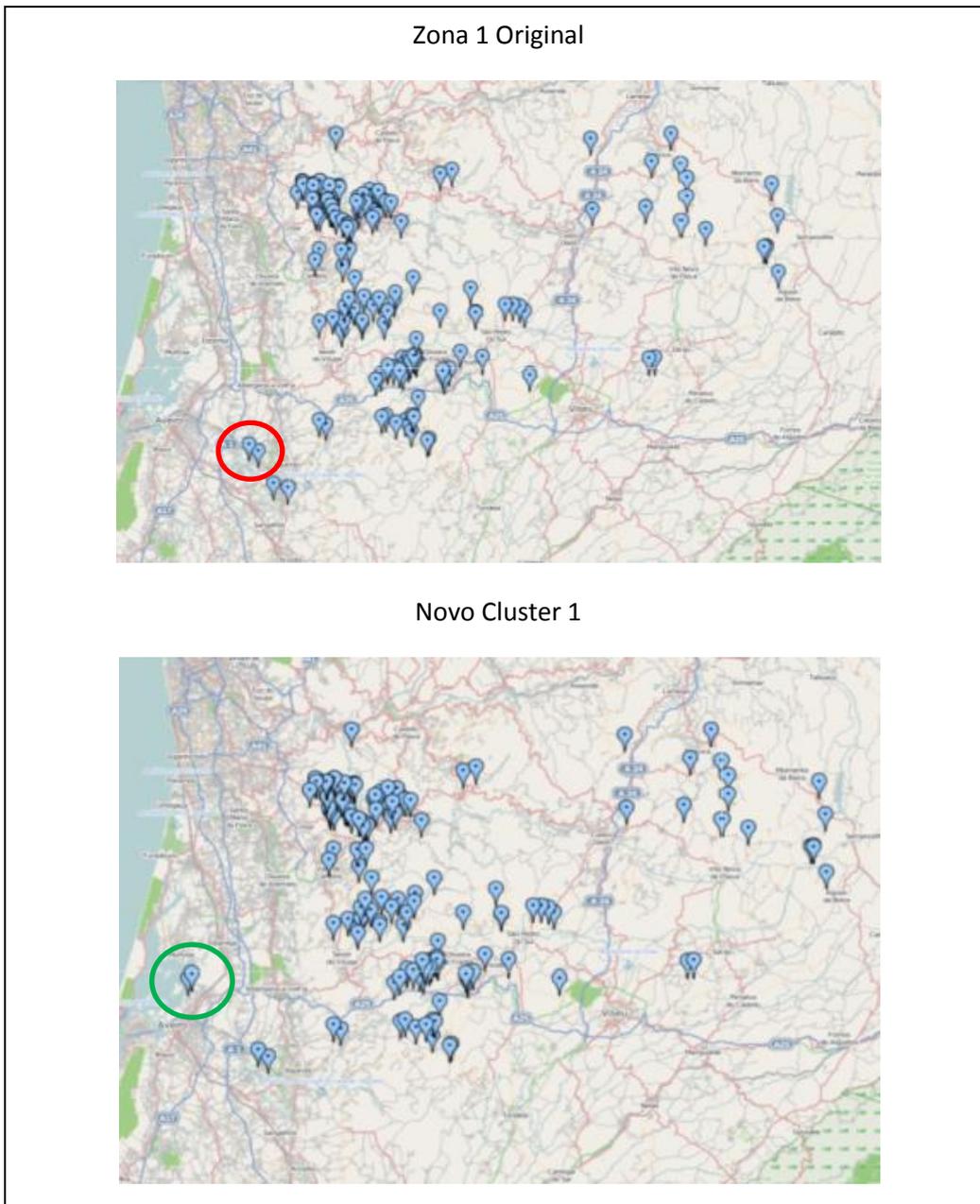


Ilustração 14 - Mapa comparativo: Zona 1 VS novo Cluster 1

Através da leitura da ilustração 14, podemos observar que o novo cluster 1 totaliza o mesmo número de clientes do que na zona original, mas substituí dois clientes: 0201506 e 0201522 (assinalados a vermelho) deixam de fazer parte do novo cluster, sendo substituídos no pelos clientes 2108552 e 2108556 (assinalados a verde).

5.1.2 - Zona2/Cluster2

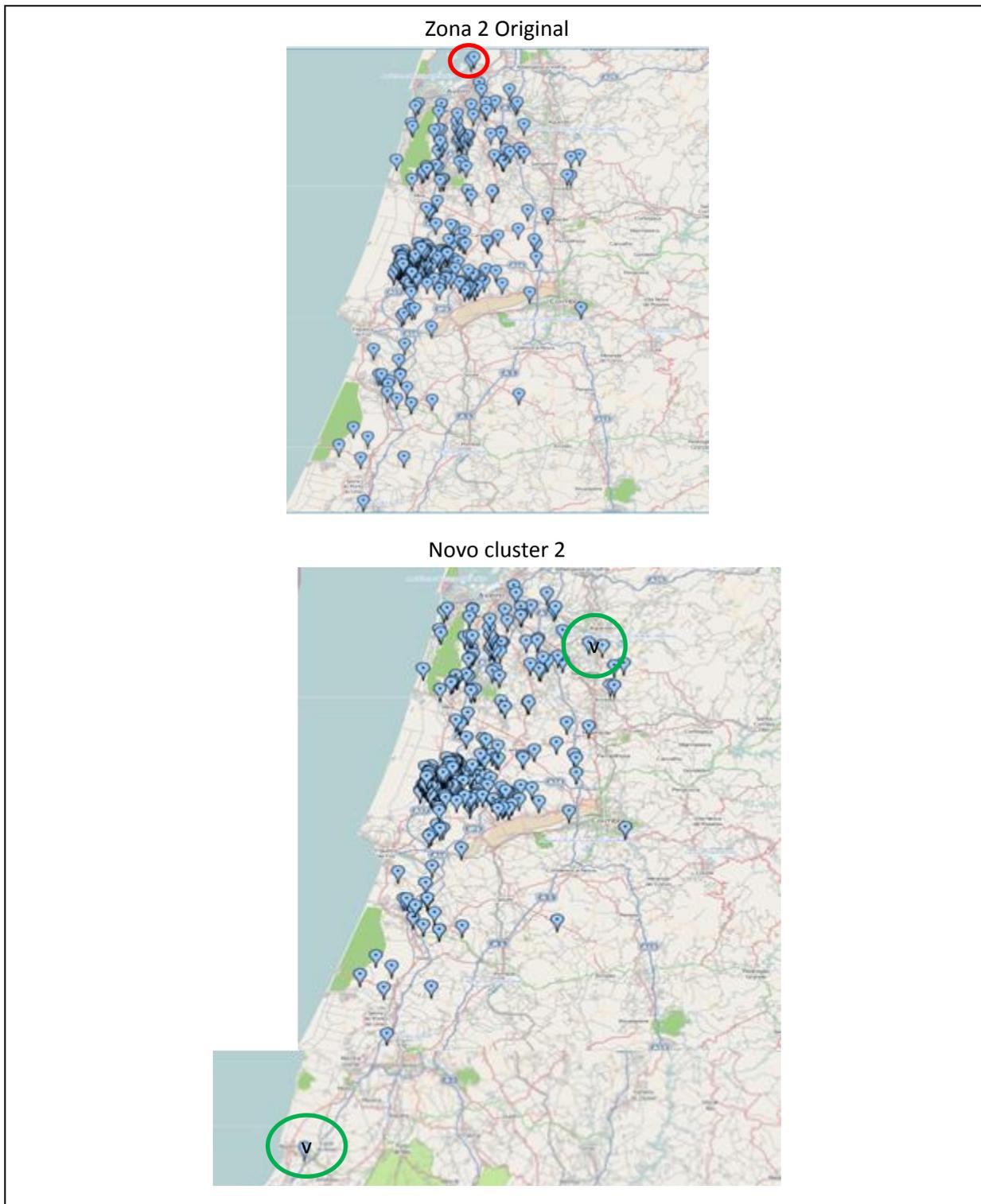


Ilustração 15 - Mapa comparativo: Zona 2 VS novo Cluster 2

Na ilustração 15 podemos observar que o novo cluster 2 totaliza 291 clientes, mais 1 do que a zona original. Entram os clientes 0201506 e 0201522 (provenientes da antiga Zona 1) e o cliente

4197501 para o novo cluster 2. Deixam de fazer parte deste cluster os clientes 2108552 e 2108556 (seleccionados a vermelho, fazem parte do cluster 1).

5.1.3 - Zona3/Cluster3

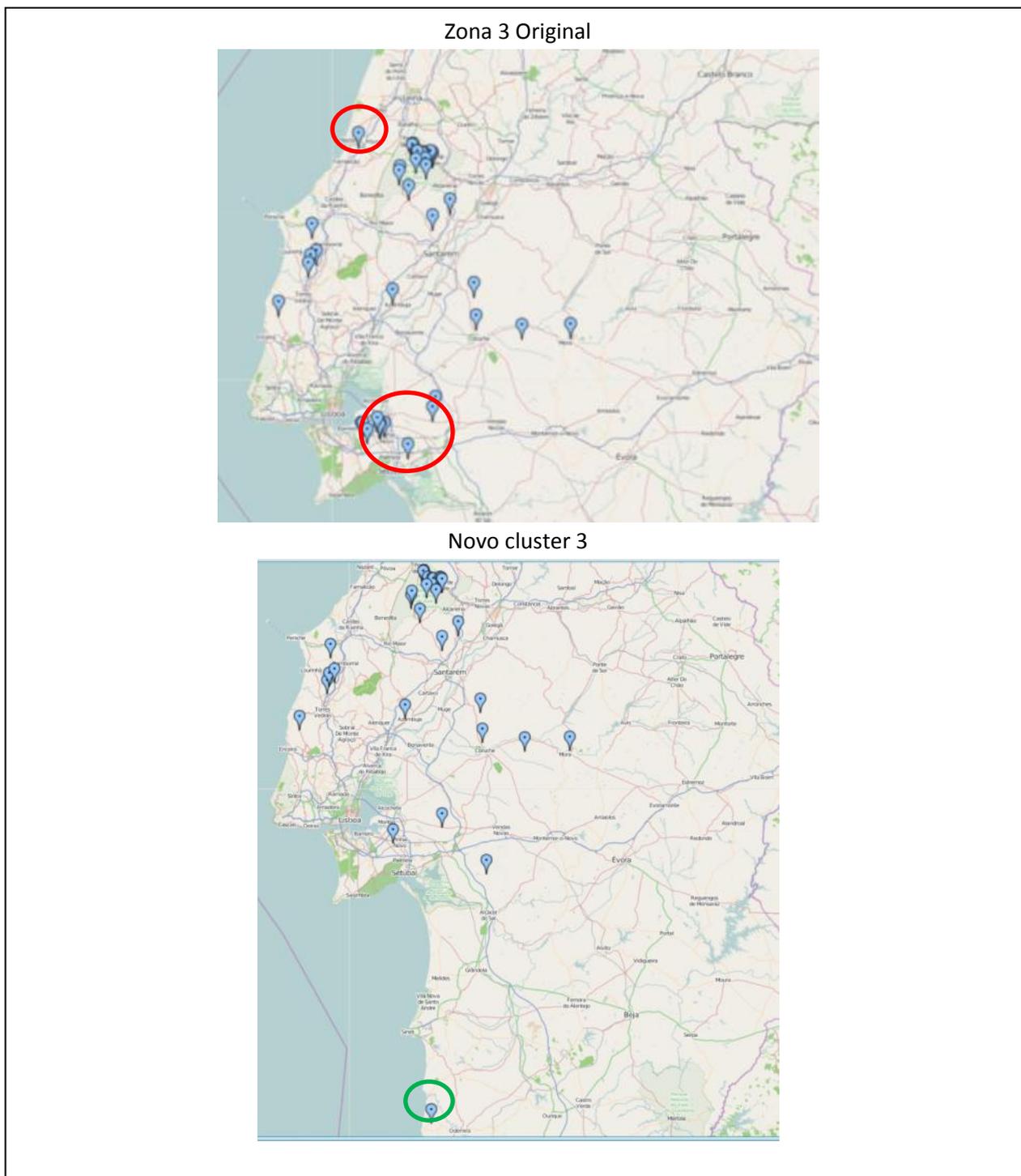


Ilustração 16 - Mapa comparativo: Zona 3 VS novo Cluster 3

A ilustração 16 mostra-nos que o novo cluster 3 totaliza 36 clientes, menos 7 do que a zona original. Saem do cluster 3 os clientes: 3660525, 3660527, 3660541, 3660542, 3677524, 3677529, 3677532, 3692551 (para o cluster 4) e o 4197501 (para o cluster 2) (seleccionados a vermelho). Entram para o cluster 3 os clientes: 3672520 e 3659510 (seleccionados a verde).

5.1.4 - Zona4/Cluster 4

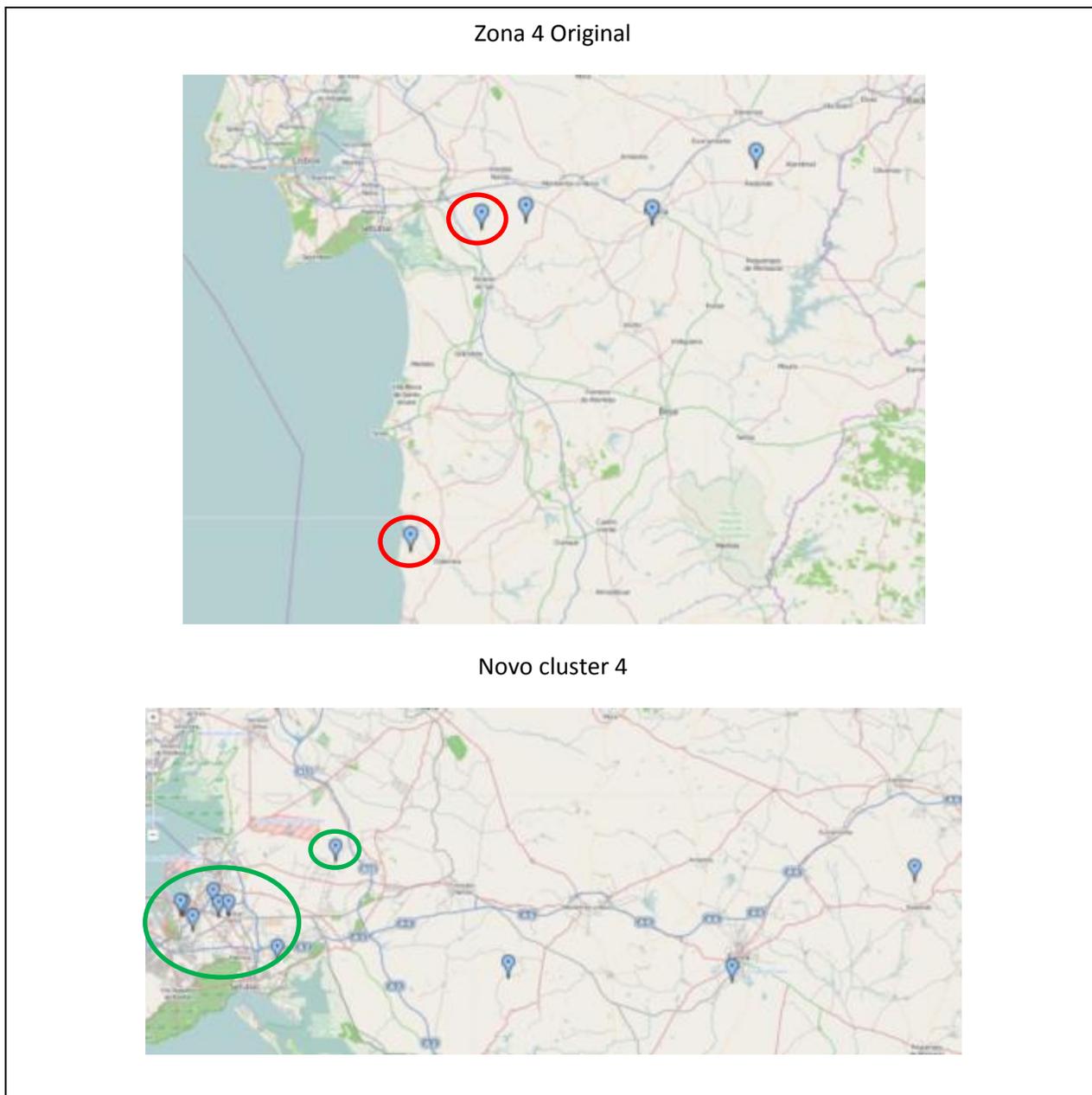


Ilustração 17 - Mapa comparativo: Zona 4 VS novo Cluster 4

Através da leitura da ilustração 17 podemos observar que o novo cluster 4 totaliza 11 clientes, mais 6 do que a zona original. Saem do cluster 4 os clientes: 3672520 e 3659510 (para o cluster 3) (seleccionados a vermelho). Entram para o cluster 4 os clientes: 3660525, 3660527, 3660541, 3660542, 3677524, 3677529, 3677532 e 3692551 (seleccionados a verde).

5.2 - Alocação Inicial

5.2.1 - A metodologia exacta

Neste capítulo os resultados não foram satisfatórios. Devido a estarmos presentes a um problema np-difícil, apenas foi possível obter resultados para a Zona 4. Como podemos observar através da leitura da tabela 7 este problema, com 112 restrições e 210 variáveis, atingiu a solução óptima de 669600 Mt em 20 segundos.

Model name: " - run #1			
Objective: Minimize(R0)			
SUBMITTED			
Model size:	112 constraints,	210 variables,	1220 non-zeros.
Sets:		0 GUB,	0 SOS.
Using DUAL simplex for phase 1 and PRIMAL simplex for phase 2. The primal and dual simplex pricing strategy set to 'Devex'.			
Relaxed solution	465015.081784 after	84 iter is B&B base.	
Feasible solution	672548 after	419 iter,	14 nodes (gap 44.6%)
Improved solution	669600 after	5367 iter,	512 nodes (gap 44.0%)
Optimal solution	669600 after	90930 iter,	7406 nodes (gap 44.0%).
Excellent numeric accuracy * = 3.41061e-011			
MEMO: lp_solve version 5.5.2.0 for 64 bit OS, with 64 bit REAL variables.			
In the total iteration count 90930, 18198 (20.0%) were bound flips.			
There were 4266 refactorizations, 0 triggered by time and 354 by density.			
... on average 17.0 major pivots per refactorization.			
The largest [LUSOL v2.2.1.0] fact(B) had 537 NZ entries, 1.1x largest basis.			
The maximum B&B level was 79, 0.2x MIP order, 16 at the optimal solution.			
The constraint matrix inf-norm is 22200, with a dynamic range of 22200.			
Time to load data was 0.004 seconds, presolve used 0.001 seconds,			
... 1.993 seconds in simplex solver, in total 1.998 seconds.			

Tabela 7 - Análise de sensibilidade Zona 4 – Metodologia exacta

A construção de rotas desta metodologia devolveu o seguinte output para o ficheiro “solverZona4.xls”:

	Rota	Código do Veículo	Capacidade do veículo (Litros)	Volume de carga (Litros)	Tempo de Viagem (Minutos)	Tempo de carga (Minutos)	Tempo total (Minutos)	Distancia percorrida (Metros)
Rota 1	0_5	20_1	16600	0	56	0	56	81657
	5_1			779	52	3	55	46114
	1_3			3100	89	9	98	117214
	3_0			2075	54	7	61	65705
Total Rota 1				5954	251	19	270	310690
Rota 2	0_4	17_1	22200	0	107	1	108	147256
	4_0			6393	111	17	128	143606
Total Rota 2				6393	218	18	236	290862
Rota 3	2_0	17_2	22200	7114	43	19	62	27573
	0_2			0	46	1	47	40475
Total Rota 3				7114	89	20	109	68048
Total Zona 4				19461	558	57	615	669600

Tabela 8 – Rotas da Zona 4 – Solução da metodologia exacta

A partir da leitura da tabela 8, concluímos que o algoritmo exacto produziu uma rota com 3 clientes, deixando 2 clientes ligados directamente ao depósito e ao estacionamento. Desta optimização resultou uma distância percorrida de 669600 Mt, recolhendo 19461 L (visitando 5 clientes) em 615 Min. Sendo esta metodologia exacta, podemos concluir que esta solução é óptima, ou seja, a distância de 669600 Mt é a distância mínima a percorrer, de forma a satisfazer todas as restrições do problema, visitando todos os clientes.

Solução no mapa	Ligação	Rota	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Tempo de carga (Min)	Distancia percorrida (Mt)
	0_5	1	0	56	0	81657
1	5_1	1	779	52	3	46114
2	1_3	1	3100	89	9	117214
3	3_0	1	2075	54	7	65705
Total			5954	251	19	310690

Tabela 9 - Solução “Rota 1” – Metodologia Exacta

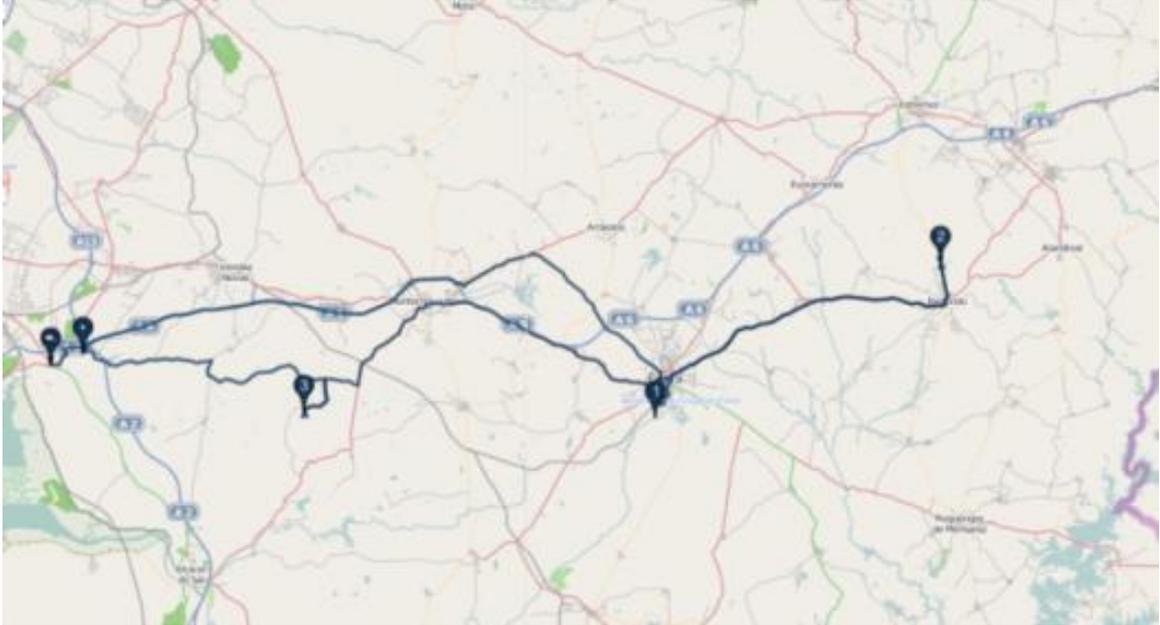


Ilustração 18 - Solução “Rota 1” – Metodologia Exacta

Na tabela 9 e na ilustração 18 está representada, com detalhe, a única rota criada (a “rota 1”). Esta rota fez a recolha em 3 localizações, num total de 5954 L de leite recolhidos, em 270 minutos. A distância percorrida para levar a cabo esta tarefa foi de 310690 Mt..

5.2.2 - Zona 1

5.2.2.1 - Heurística de Clarke & Wright -Zona 1

A heurística de Clarke & Wright devolveu os seguintes resultados para a zona 1:

Rotas criadas

Rota	Veículo	Capacidade do veículo (litros)	Tempo de carga (minutos)	Tempo total (minutos)	Volume de carga (litros)	Distancia percorrida (metros)
3	21_1	16600	51	254	15550	154295
42	642_1	10750	53	172	8198	71884
24	642_2	10750	39	208	4580	110384
144	731_1	10250	18	265	1856	247920
75	731_2	10250	28	269	2123	189060
8	732_1	10250	10	267	831	257253
47	732_2	10250	51	269	7075	128461
113	732_3	10250	26	269	2593	191556
127	732_4	10250	32	257	3208	145436
9	734_1	10250	12	264	953	247959
93	734_2	10250	42	271	4930	172286
102	734_3	10250	36	270	1464	162356
Total			398	3035	53361	2078850

Tabela 10 – Resultados da Heurística de Clarke & Wright – Zona 1

podemos observar a partir da leitura da tabela 10, a heurística de Clarke & Wright produziu 12 rotas. Desta optimização resultou uma distância percorrida de 2078850 Mt, recolhendo 53361 L (visitando 146 clientes) em 3035 Min.

Solução no mapa	Ligação	Rota	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Tempo de carga (Min)	Distancia percorrida (Mt)
	0_21	3	0	28	0	21677
1	21_100	3	263	43	2	29269
2	100_3	3	43	36	2	26044
3	3_4	3	756	7	3	2879
4	4_5	3	1837	21	6	15082
5	5_2	3	435	8	3	3580
6	2_6	3	5038	16	14	10204
7	6_1	3	4650	5	13	2431
8	1_0	3	2528	39	8	43129
Total			15550	203	51	154295

Tabela 11 - Exemplo de rota criada na Zona 1 (Rota 3) – Heurística de Clarke & Wright

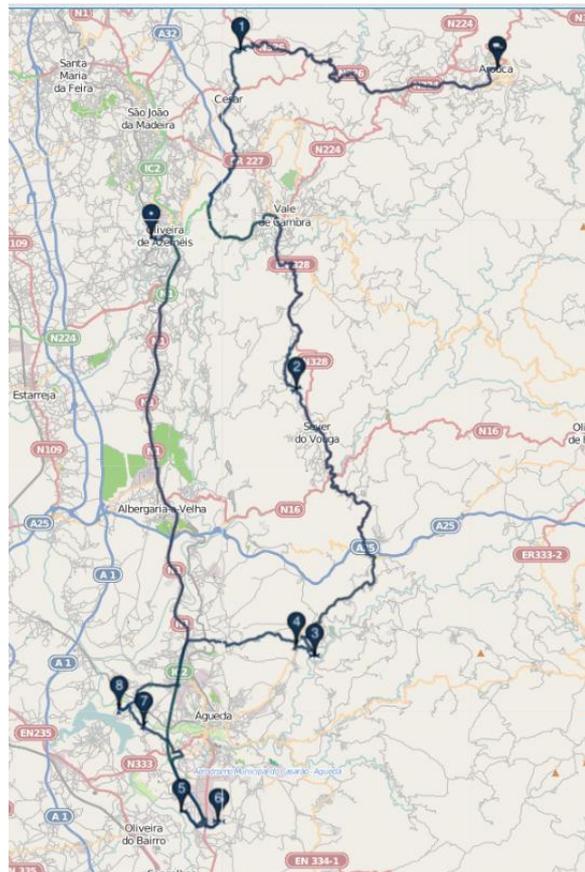


Ilustração 19 - Representação geográfica – Zona 1 (Rota 3) – Heurística de Clarke & Wright

Na tabela 11 e na ilustração 19 está representada, com detalhe e a título exemplificativo, uma das rotas criadas por este algoritmo na zona 1 (a “rota 3”). Ao analisar a tabela 11, verificamos que foram recolhidos 15550 L de mercadoria em 254 Min (203+51), percorrendo um distância de 154295 Mt..

5.2.2.2 - Algoritmo de 2ª Ordem - Zona 1

O Algoritmo de 2ª Ordem devolveu os seguintes resultados para a zona 1:

Rotas criadas

Rota	Código do Veículo	Capacidade do veículo (L)	Tempo de carga (Min)	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
8	732_1	10250	10	267	831	257253
144	731_1	10250	18	265	1856	247920
9	734_1	10250	12	264	953	247959
116	732_2	10250	32	270	3457	177134
75	731_2	10250	32	269	2687	184715
111	734_2	10250	38	269	3584	158246
25	732_3	10250	22	196	2816	116460
47	731_3	10250	51	269	7075	128461
102	734_3	10250	43	266	2122	152198
24	642_3	10750	74	262	10680	108734
20	745_1	20250	64	253	17300	144697
Total			396	2850	53361	1923777

Tabela 12 - Resultados do Algoritmo de 2ª Ordem - Zona 1

Como podemos observar a partir da leitura da tabela 12, o Algoritmo de 2ª Ordem, produziu 11 rotas. Desta optimização resultou uma distância percorrida de 1923777 Mt, recolhendo 53361 L (visitando 146 clientes) em 2850 Min.

Solução no mapa	Ligação	Rota	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Tempo de carga (Min)	Distancia percorrida (Mt)
	0_139	8	0	70	0	63314
1	139_7	8	196	29	2	25568
2	7_8	8	164	22	2	16600
3	8_11	8	173	13	2	8592
4	11_141	8	220	64	2	58881
5	141_0	8	78	59	2	84298
Total			831	257	10	257253

Tabela 13 - Exemplo de rota criada na Zona 1 (Rota 8) – Algoritmo de 2ª Ordem

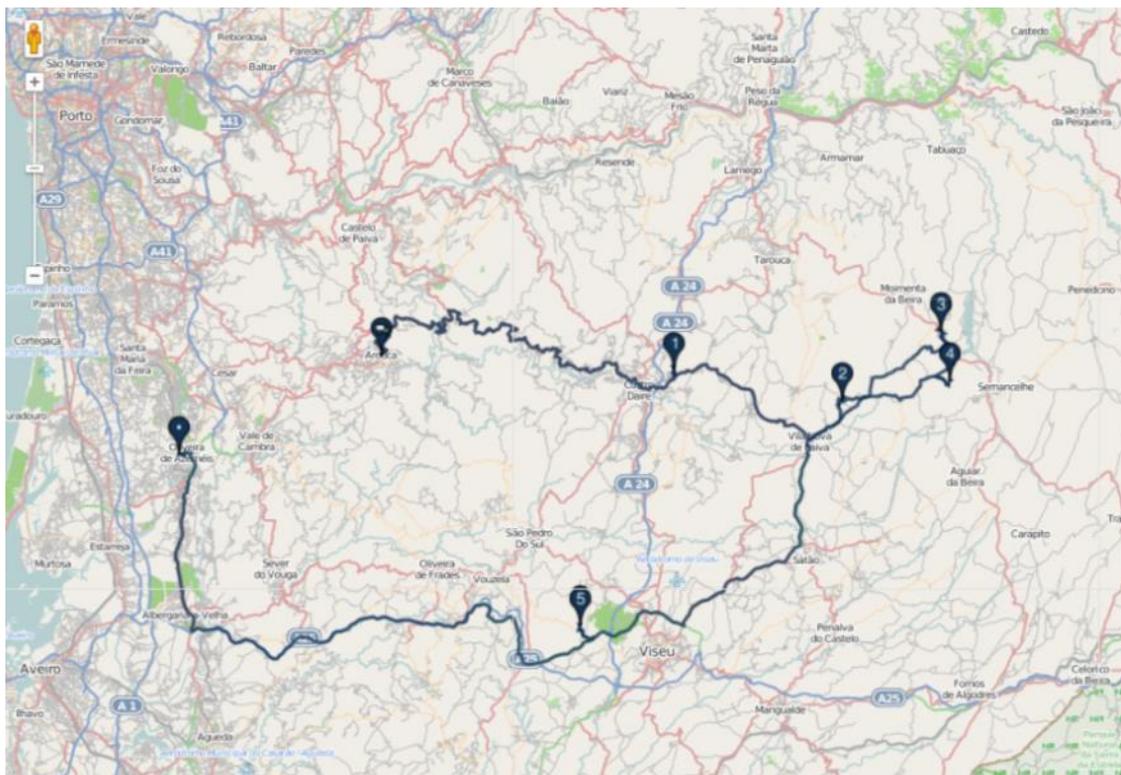


Ilustração 20- Representação geográfica – Zona 1 (Rota 8) – Algoritmo de 2ª Ordem - Zona1

Na tabela 13 e na ilustração 20 está representada, com detalhe e a título exemplificativo, uma das rotas criadas por este algoritmo na zona 1 (a “rota 8”). Ao analisar a tabela 13, verificamos que foram recolhidos 831 L de mercadoria em 267 Min (257+10), percorrendo um distância de 257253 Mt..

5.2.3 - Zona 2

5.2.3.1 - Heurística de Clarke & Wright - Zona 2

A heurística de Clarke & Wright devolveu os seguintes resultados para a zona 2:

Rotas criadas						
Rota	Código do Veículo	Capacidade do veículo (L)	Tempo de carga (Min)	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
183	639_1	10750	47	157	10282	141439
272	639_2	10750	74	249	10676	107158
14	639_3	10750	87	232	10693	75434
176	640_1	10750	59	246	10706	187855

Optimização de rotas na recolha de leite

156	640_2	10750	67	234	10590	131111
216	640_3	10750	72	187	10642	78304
147	641_1	10750	69	244	10733	141002
103	641_2	10750	68	270	10613	134157
189	641_3	10750	89	169	10719	33449
161	643_1	10750	73	227	10732	110970
211	643_2	10750	73	184	10686	59310
64	643_3	10750	69	120	10717	25821
9	645_1	10250	60	124	8734	25910
130	646_1	10250	44	268	7880	195846
105	652_1	10250	61	222	9934	88877
140	653_1	10250	60	119	8529	26049
42	655_1	10250	26	57	4956	14011
Total			1098	3309	167822	1576703

Tabela 14 - Resultados da Heurística de Clarke & Wright – Zona 2

Como podemos observar a partir da leitura da tabela 14, a heurística de Clarke & Wright produziu 17 rotas. Desta optimização resultou uma distância percorrida de 1576703 Mt, recolhendo 167822 L (visitando 290 clientes) em 3309 Min.

Solução no mapa	Ligação	Rota	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Tempo de carga (Min)	Distancia percorrida (Mt)
	0_43	42	0	10	0	5364
1	43_77	42	215	2	2	1185
2	77_49	42	275	2	2	648
3	49_92	42	479	2	3	405
4	92_59	42	184	1	2	539
5	59_42	42	860	2	4	405
6	42_65	42	2330	2	8	615
7	65_76	42	363	3	3	768
8	76_0	42	250	7	2	4082
Total			4956	31	26	14011

Tabela 15 - Exemplo de rota criada na Zona 2 (Rota 42) – heurística de Clarke & Wright

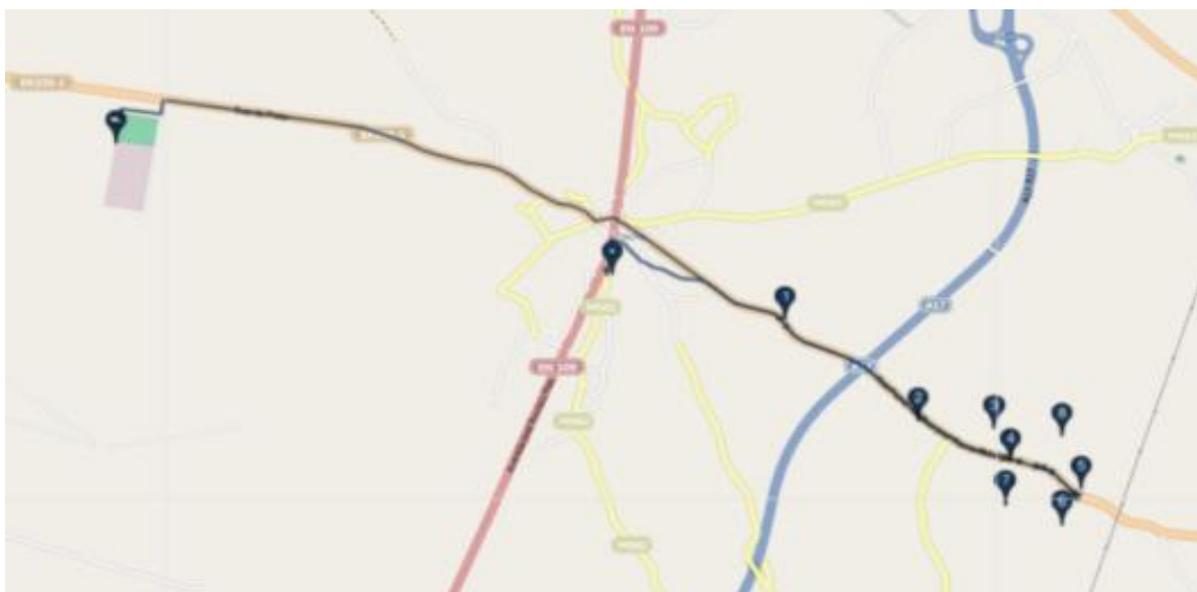


Ilustração 21 - Representação geográfica – Zona 2 (Rota 42) – Heurística de Clarke & Wright

Na tabela 15 e na ilustração 21 está representada, com detalhe e a título exemplificativo, uma das rotas criadas pelo algoritmo exacto na zona 2 (“rota 42”). Ao analisar a tabela 15, verificamos que foram recolhidos 4956 L de mercadoria em 57 Min (31+26), percorrendo um distância de 14011 Mt..

5.2.3.2 - Algoritmo de 2ª Ordem - Zona 2

O Algoritmo de 2ª Ordem devolveu os seguintes resultados para a zona 2:

Rotas criadas

Rota	Código do Veículo	Capacidade do veículo (L)	Tempo de carga (Min)	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
114	653_1	10250	50	270	9790	156637
189	646_1	10250	85	155	9966	26566
53	655_1	10250	60	112	10036	19593
183	639_1	10750	47	157	10282	141439
176	640_1	10750	59	246	10706	187855
147	641_1	10750	69	245	10733	140849
282	643_1	10750	78	246	10743	108269
156	639_2	10750	69	238	10684	126589
245	640_2	10750	74	224	10405	90016
14	641_2	10750	77	268	10746	112907
1	643_2	10750	75	174	10691	52060

Optimização de rotas na recolha de leite

201	639_3	10750	83	173	10708	43205
36	640_3	10750	64	112	10668	24860
181	641_3	10750	76	233	10555	124264
44	643_3	10750	87	183	10739	42906
96	639_4	10750	71	227	10370	80985
Total			1124	3263	167822	1479000

Tabela 16 - Resultados do Algoritmo de 2ª Ordem - Zona 2

Como podemos observar a partir da leitura da tabela 16, este algoritmo produziu 16 rotas. Desta optimização resultou uma distância percorrida de 1479000 Mt, recolhendo 167822 L (visitando 290 clientes) em 3263 Min.

Solução no mapa	Ligação	Rota	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Tempo de carga (Min)	Distancia percorrida (Mt)
	0_95	114	0	35	0	24205
1	95_11	114	1939	3	7	897
2	11_13	114	61	1	2	275
3	13_112	114	214	23	2	14687
4	112_114	114	68	20	2	17783
5	114_188	114	130	39	2	34755
6	188_2	114	449	41	3	28471
7	2_133	114	2819	19	10	11945
8	133_222	114	164	2	2	499
9	222_134	114	2710	6	10	2935
10	134_225	114	682	2	4	681
11	225_216	114	269	5	2	1889
12	216_204	114	166	16	2	10556
13	204_0	114	119	8	2	7059
Total			9790	220	50	156637

Tabela 17 - Exemplo de rota criada na Zona 2 (Rota 114) – Algoritmo de 2ª Ordem



Ilustração 22 - Representação geográfica - Zona 2 (Rota 114) – Algoritmo de 2ª Ordem

Na tabela 17 e na ilustração 22 está representada, com detalhe e a título exemplificativo, uma das rotas criadas por este algoritmo na zona 1 (a “rota 114”). Ao analisar a tabela 17, verificamos que foram recolhidos 9790 L de mercadoria em 270 Min (220+50), percorrendo um distância de 156637 Mt..

5.2.4 - Zona 3

5.2.4.1 - Heurística de Clarke & Wright - Zona 3

A heurística de Clarke & Wright devolveu os seguintes resultados para a zona 3:

Rotas criadas

Rota	Veículo	Capacidade do veículo (litros)	Tempo de carga (minutos)	Tempo total (minutos)	Volume de carga (litros)	Distancia percorrida (metros)
23	19_1	22200	60	203	20029	152516
38	20_1	16600	31	258	9596	264857
12	20_2	16600	49	266	9527	223410
41	20_3	16600	35	236	12985	287021
28	22_1	22200	55	178	21015	121640
19	43_1	30000	73	257	27767	194615
20	43_2	30000	67	255	25818	183067
Total			370	1653	126737	1427126

Clientes no “Estado inicial”

Ligação	Quantidade recolhida (litros)	Tempo Total de viagem (minutos)	Distancia percorrida (metros)
0_31	0	19	14536
31_0	11843	53	86469
Total	11843	72	101005

	Quantidade recolhida (litros)	Tempo Total (Min)	Distancia percorrida (metros)
Total da Zona	138580	1725	1528131

Tabela 18 - Resultados do Heurística de Clarke & Wright – Zona 3

Como podemos observar a partir da leitura da tabela 18, a heurística de Clarke & Wright produziu 8 rotas. Esta solução representa uma distância total percorrida de 1528131 Mt, recolhendo 138580 L (visitando 43 clientes) em 1725 Min. O algoritmo não conseguiu alocar todos os clientes a uma rota, ficando o cliente 31 ligado directamente ao depósito e ao estacionamento. É de realçar que a tabela com Clientes no “Estado inicial” não possui o tempo de carga porque não está alocado nenhum veículo a esta rota. Como o tempo de carga está dependente da capacidade da bomba de extracção de cada veículo, não foi contabilizado o tempo de carga. Esta situação pode ocorrer por três motivos:

- Associados à lista de poupanças (devido ao facto de todas as ligações do cliente 31 com outros clientes levarem a um $P_{ij} \leq 0$);
- Devido ao algoritmo nunca conseguir juntar este cliente a outros (inibindo a formação de uma nova rota), devido a restrições de tempo ou capacidade;
- Devido ao facto da dimensão das viaturas disponíveis não serem compatíveis com este cliente;

Nesta solução o cliente 31 não partilha uma rota com outros clientes, permanecendo como no estado inicial descrito no ponto 4.4, na ilustração 9 a). Nestas situações, o gestor das rotas deve

analisar particularmente estes casos, verificando se é possível efectuar estes trajectos. Este raciocínio aplica-se a todos os casos onde o algoritmo permita que os clientes sejam servidos em rotas individuais.

Solução no mapa	Ligação	Rota	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Tempo de carga (Min)	Distancia percorrida (Mt)
	0_30	23	0	27	0	31133
1	30_29	23	986	6	4	2773
2	29_23	23	1024	5	4	1532
3	23_25	23	7817	11	21	4410
4	25_24	23	776	12	3	7154
5	24_27	23	5209	2	15	574
6	27_26	23	2310	11	7	5968
7	26_0	23	1907	69	6	98972
Total			20029	143	60	152516

Tabela 19 - Exemplo de rota criada na Zona 3 (Rota 23) – Heurística de Clarke & Wright

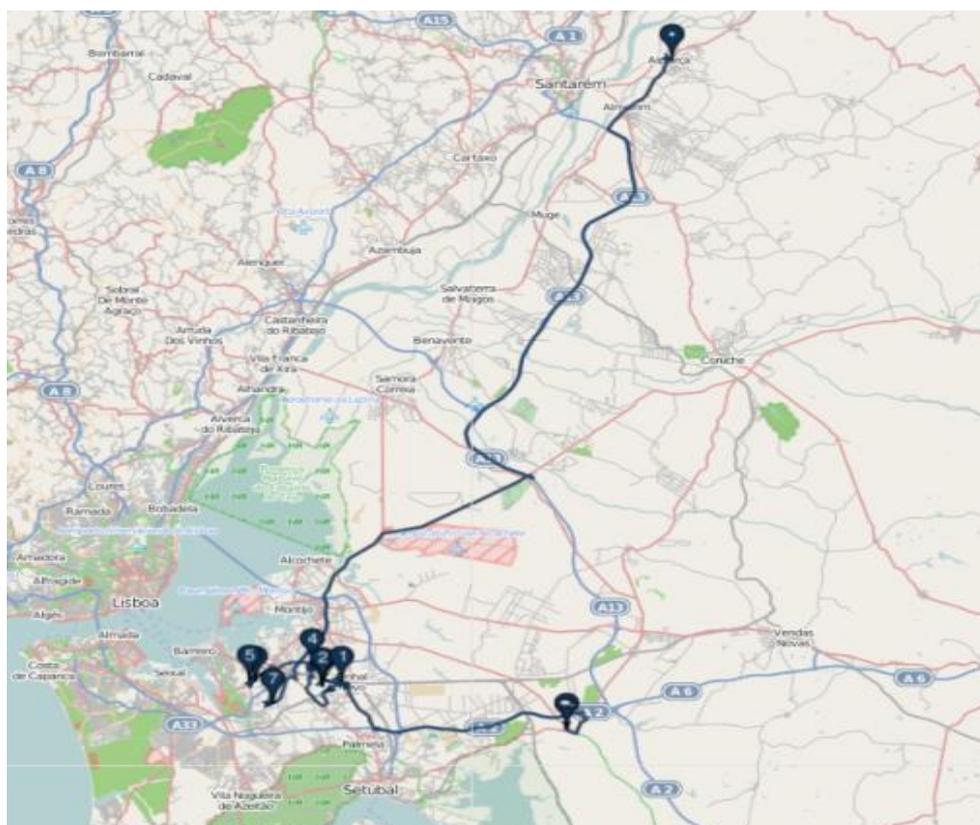


Ilustração 23 - Representação geográfica – Zona 3 (Rota 23) – Heurística de Clarke & Wright

Na tabela 19 e na ilustração 23 está representada, com detalhe e a título exemplificativo, uma das rotas criadas pelo algoritmo exacto na zona 3 (“rota 23”). Ao analisar a tabela 19, verificamos que foram recolhidos 20029 L de mercadoria em 203 Min (143+60), percorrendo um distância de 152516 Mt..

5.2.4.2 - Algoritmo de 2ª Ordem - Zona 3

O algoritmo de pesquisa local devolveu os seguintes resultados para a zona 3:

Rotas criadas

Rota	Código do Veículo	Capacidade do veículo (L)	Tempo de carga (Min)	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
38	20_1	16600	31	233	9596	214524
12	20_2	16600	46	247	9126	213659
41	20_3	16600	35	236	12985	287021
23	17_1	22200	60	203	20029	152516
28	22_1	22200	55	178	21015	121640
19	43_1	30000	75	266	28168	197627
20	43_2	30000	67	255	25818	183067
Total			369	1618	126737	1370054

Clientes no "Estado inicial"

Ligação	Quantidade recolhida (litros)	Tempo Total de viagem (minutos)	Distancia percorrida (metros)
0_31	0	19	14536
31_0	11843	53	86469
Total	11843	72	101005

	Quantidade recolhida (litros)	Tempo Total (Min)	Distancia percorrida (metros)
Total da Zona	138580	1690	1471059

Tabela 20 - Resultados do Algoritmo de 2ª Ordem - Zona 3

Como podemos observar a partir da leitura da tabela 20, este algoritmo produziu 8 rotas. Desta optimização resultou uma distância percorrida de 1471059 Mt, recolhendo 138580 L (visitando 43 clientes) em 1690 Min. O algoritmo não conseguiu alocar todos os clientes a uma rota, ficando o cliente 31 ligado directamente ao depósito e ao estacionamento.

Solução no mapa	Ligação	Rota	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Tempo de carga (Min)	Distancia percorrida (Mt)
	0_32	38	0	19	0	16816
1	32_39	38	305	68	2	98305
2	39_37	38	2267	20	7	7378
3	37_38	38	2185	10	7	3517
4	38_40	38	4233	26	12	14856
5	40_0	38	606	59	3	73652
Total			9596	202	31	214524

Tabela 21 - Exemplo de rota criada na Zona 3 (Rota 38) – Algoritmo de 2ª Ordem

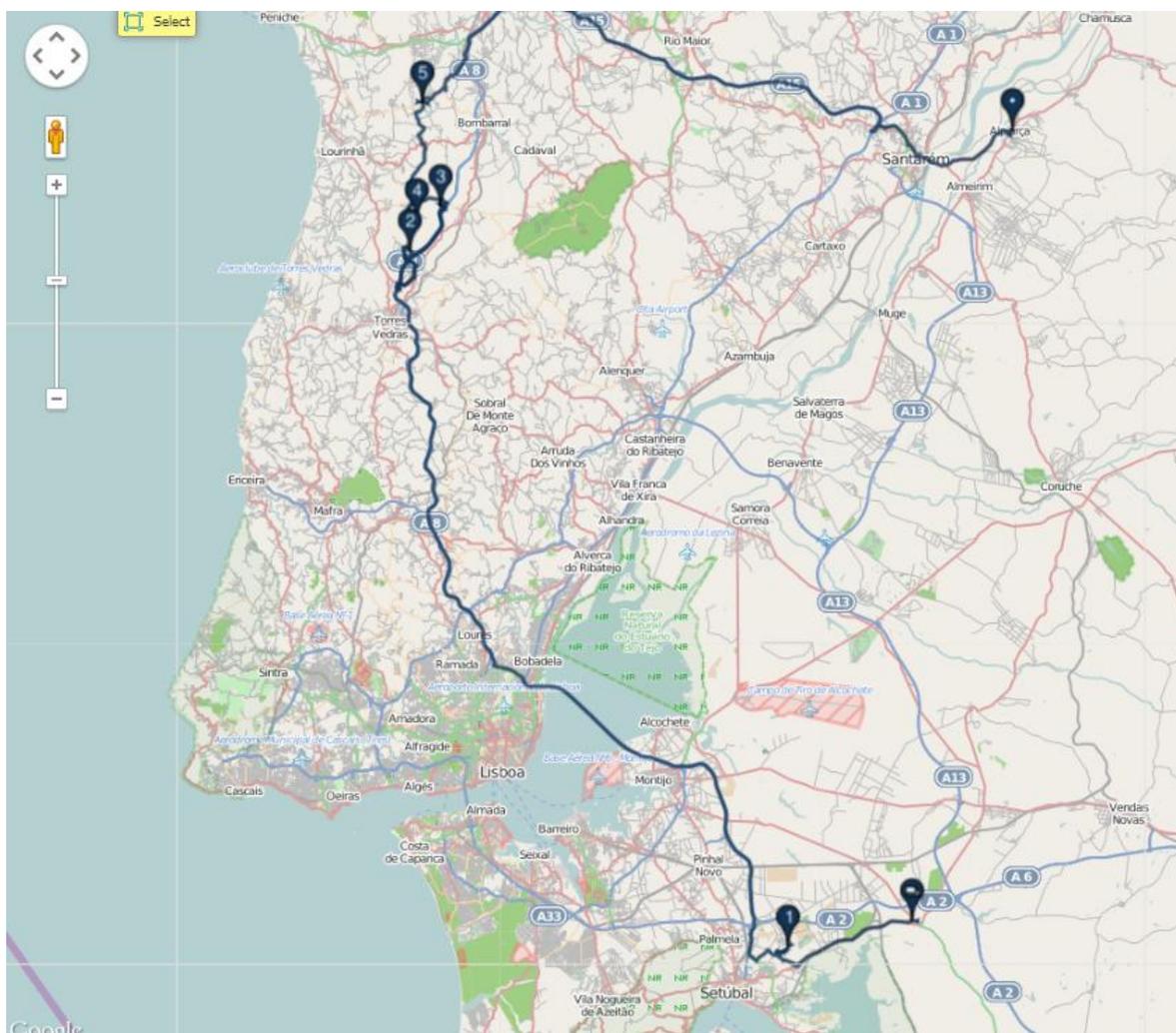


Ilustração 24 - Representação geográfica - Zona 3 (Rota 38) – Algoritmo de 2ª Ordem

Na tabela 21 e na ilustração 24 está representada, com detalhe e a título exemplificativo, uma das rotas criadas por este algoritmo na zona 1 (a “rota 38”). Ao analisar a tabela 21, verificamos que foram recolhidos 9596 L de mercadoria em 233 Min (202+31), percorrendo uma distância de 214524 Mt..

5.2.5 - Zona 4

5.2.5.1 - Heurística de Clarke & Wright - Zona 4

A heurística de Clarke & Wright devolveu os seguintes resultados para a zona 4:

Rotas criadas

Rota	Veículo	Capacidade do veículo (litros)	Tempo de carga (minutos)	Tempo total (minutos)	Volume de carga (litros)	Distancia percorrida (metros)
1	20_1	16600	19	270	5954	310690

Clientes no “Estado inicial”

Ligação	Quantidade recolhida (litros)	Tempo de total de viagem (minutos)	Distancia percorrida (metros)
0_2	0	46	40475
2_0	7114	43	27573
Total	7114	89	68048

Ligação	Quantidade recolhida (litros)	Tempo de total de viagem (minutos)	Distancia percorrida (metros)
0_4	0	107	147256
4_0	6393	111	143606
Total	6393	218	290862

	Quantidade recolhida (litros)	Tempo Total (Min)	Distancia percorrida (metros)
Total da Zona	19461	577	669600

Tabela 22 - Resultados da Heurística de Clarke & Wright – Zona 4

Como podemos observar a partir da leitura da tabela 22, a heurística de Clarke & Wright produziu 3 rotas, sendo que em duas delas os clientes estão ligados directamente ao depósito e ao estacionamento. Desta optimização resultou uma distância percorrida de 669600 Mt, recolhendo 19461 L (visitando 5 clientes) em 577 Min. Podemos verificar que a heurística de Clarke & Wright conseguiu atingir a solução óptima, porque os resultados apresentados na tabela 22 são idênticos aos resultados apresentados no ponto 5.2.1 – “Metodologia exacta”.

Solução no mapa	Ligação	Rota	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Tempo de carga (Min)	Distancia percorrida (Mt)
	0_5	1	0	56	0	81657
1	5_1	1	779	52	3	46114
2	1_3	1	3100	89	9	117214
3	3_0	1	2075	54	7	65705
Total			5954	251	19	310690

Tabela 23 - Exemplo de rota criada na Zona 4 (Rota 1) – Heurística de Clarke & Wright

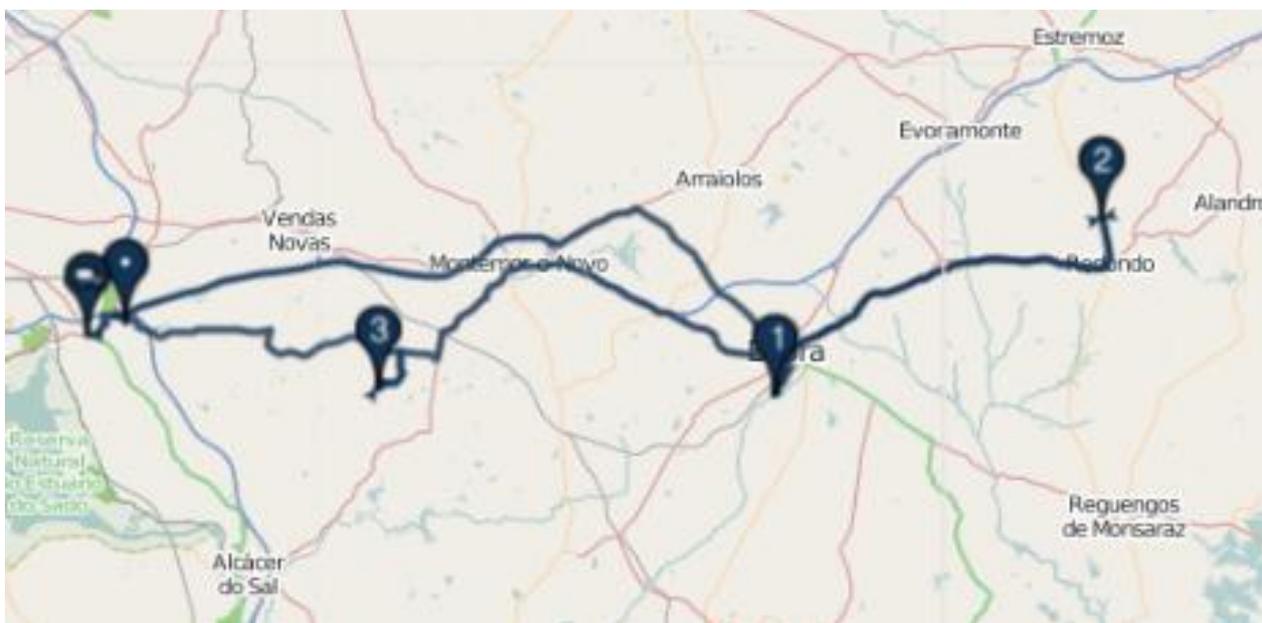


Ilustração 25 -Representação geográfica – Zona 4 (Rota 1) – Heurística de Clarke & Wright

Na tabela 23 e na ilustração 25 está representada, com detalhe, a única rota criada (a “rota 1”). Ao analisar a tabela 23, verificamos que foram recolhidos 5954 L de mercadoria em 270 Min (251+19), percorrendo um distância de 310690 Mt..

5.2.5.2 - Algoritmo de 2ª Ordem - Zona 4

Não foram apresentados os resultados desta zona para esta metodologia, por serem idênticos aos resultados apresentados no ponto 5.2.1 e 5.2.5.1, por ser a solução óptima.

5.3 - Nova Alocação

5.3.1 - Cluster 1

5.3.1.1 - Heurística de Clarke & Wright - Cluster 1

Rotas criadas						
Rota	Código do Veículo	Capacidade do veículo (L)	Tempo de carga (Min)	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
2	21_1	16600	50	269	11011	158344
129	642_1	10750	14	116	963	74846
144	731_1	10250	18	268	1856	248653
70	731_2	10250	38	269	3438	167223
113	731_3	10250	26	266	677	178324
56	731_4	10250	51	265	6927	124959
6	732_1	10250	10	266	842	253864
142	732_2	10250	12	268	953	250019
111	734_1	10250	35	267	3700	175702
116	734_2	10250	36	265	4068	163276
23	734_3	10250	34	265	4734	158828
27	734_4	10250	47	192	8985	84872
Total			371	2976	48154	2038910

Tabela 24 - Resultados da Heurística de Clarke & Wright com alocação – Cluster 1

Como podemos observar a partir da leitura da tabela 24, a heurística de Clarke & Wright produziu 12 rotas. Desta optimização resultou uma distância percorrida de 2038910 Mt, recolhendo 48154 L (visitando 146 clientes) em 2976 Min.

5.3.1.2 - Algoritmo de 2ª Ordem - Cluster 1

Rotas criadas

Rota	Código do Veículo	Capacidade do veículo (L)	Tempo de carga (Min)	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
2	21_1	16600	51	266	11361	152446
6	732_1	10250	10	266	842	253864
144	731_1	10250	18	268	1856	248653
121	734_1	10250	31	241	1246	145563
142	732_2	10250	25	264	2235	202283
70	731_2	10250	33	261	2874	165175
115	732_3	10250	27	245	2825	169714
136	731_3	10250	27	262	2776	174094
15	732_4	10250	34	264	4734	157292
56	734_4	10250	55	269	7645	124957
63	642_1	10750	71	239	9760	100842
Total			382	2845	48154	1894883

Tabela 25 - Resultados do Algoritmo de 2ª Ordem com alocação - Cluster 1

Como podemos observar a partir da leitura da tabela 25, este algoritmo produziu 11 rotas. Desta optimização resultou uma distância percorrida de 1894883 Mt, recolhendo 48154 L (visitando 146 clientes) em 2845 Min.

Solução no mapa	Ligação	Rota	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Tempo de carga (Min)	Distancia percorrida (Mt)
	0_52	2	0	14	0	12484
1	52_100	2	426	34	3	25135
2	100_99	2	43	12	2	5869
3	99_105	2	85	9	2	3793
4	105_102	2	80	4	2	1241
5	102_104	2	180	3	2	629
6	104_103	2	31	4	2	2206
7	103_101	2	324	2	2	590
8	101_2	2	155	34	2	24879
9	2_3	2	756	7	3	2879
10	3_4	2	1837	20	6	15200
11	4_1	2	4650	5	13	2431

12	1_87	2	2528	29	8	19448
13	87_88	2	74	3	2	1331
14	88_0	2	192	35	2	34331
Total			11361	215	51	152446

Tabela 26 - Exemplo de rota criada na Cluster 1 (Rota 2) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação

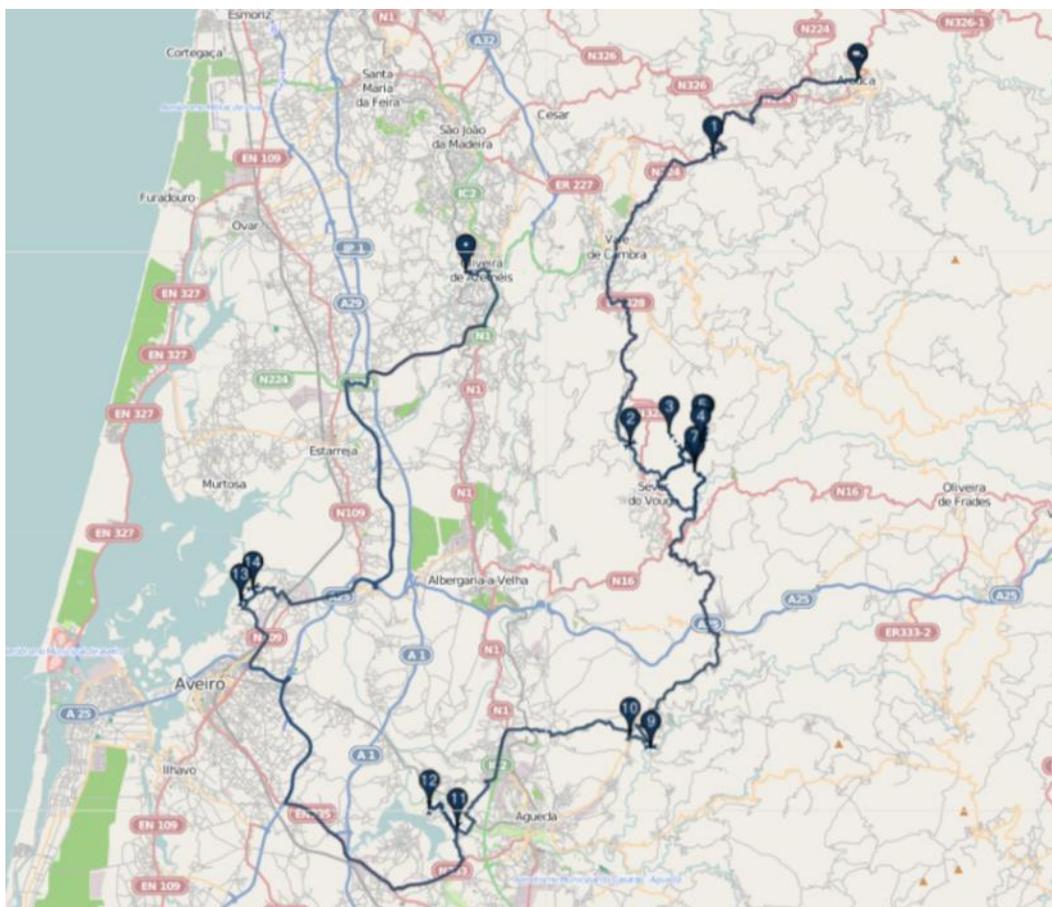


Ilustração 26 - Representação geográfica - (Rota 2) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação- Cluster 1

Na tabela 26 e na ilustração 26 está representada, com detalhe e a título exemplificativo, uma das rotas criadas por este algoritmo no cluster 1 (a “rota 2”). Ao analisar a tabela 26, verificamos que foram recolhidos 11361 L de mercadoria em 266 Min (215+51), percorrendo um distância de 152446 Mt..

5.3.2 - Cluster 2

5.3.2.1 - Heurística de Clarke & Wright - Cluster 2

Rotas criadas

Rota	Código do Veículo	Capacidade do veículo (L)	Tempo de carga (Min)	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
74	639_1	10750	51	165	10517	141513
165	639_2	10750	62	190	10606	114204
17	639_3	10750	66	243	10667	133111
111	639_4	10750	63	110	10608	23782
145	640_1	10750	64	245	10686	141930
3	640_2	10750	71	229	10696	102692
47	640_3	10750	75	171	10703	45715
173	640_4	10750	81	176	10686	43331
75	641_1	10750	61	247	10686	172818
88	641_2	10750	68	250	10729	112276
176	641_3	10750	91	179	10744	37508
19	643_1	10750	71	224	10655	109830
161	643_2	10750	86	253	10747	86014
116	643_3	10750	77	176	10727	53704
212	646_1	10250	64	210	8422	88323
63	652_1	10250	56	298	10353	287066
7	653_1	10250	22	55	3707	17417
69	655_1	10250	61	119	8103	21685
Total			1190	3540	180042	1732919

Tabela 27 - Resultados da Heurística de Clarke & Wright com alocação – Cluster 2

Como podemos observar a partir da leitura da tabela 27, a heurística de Clarke & Wright produziu 18 rotas. Desta optimização resultou uma distância percorrida de 1732919 Mt, recolhendo 180042 L (visitando 291 clientes) em 3540 Min.

5.3.2.2 - Algoritmo de 2ª Ordem - Cluster 2

Rotas criadas

Rota	Código do Veículo	Capacidade do veículo (L)	Tempo de carga (Min)	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
75	639_1	10750	55	215	10674	218622
70	645_1	10250	53	270	9803	158483
38	646_1	10250	44	268	10109	219432
74	640_1	10750	54	186	10718	137474
145	641_1	10750	67	254	10688	138226
3	643_1	10750	66	214	10617	103070
88	639_2	10750	68	257	10705	111613
165	640_2	10750	66	198	10736	111645
5	641_2	10750	75	242	10408	100233
95	643_2	10750	84	238	10684	77893
116	639_3	10750	74	174	10717	52387
34	640_3	10750	72	236	10679	97272
47	641_3	10750	75	171	10703	45713
176	643_3	10750	88	174	10701	37797
2	639_4	10750	63	109	10715	22982
21	640_4	10750	77	134	10703	21740
27	641_4	10750	96	179	10682	28681
Total			1177	3519	180042	1683263

Tabela 28 - Resultados do Algoritmo de 2ª Ordem com alocação - Cluster 2

Solução no mapa	Ligação	Rota	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Tempo de carga (Min)	Distancia percorrida (Mt)
	0_63	75	0	65	0	102758
1	63_75	75	7013	37	32	55972
2	75_196	75	1090	1	6	51
3	196_94	75	545	9	4	6917
4	94_211	75	1546	9	8	6300
5	211_184	75	146	11	2	6606
6	184_0	75	334	28	3	40018
Total			10674	160	55	218622

Tabela 29 - Exemplo de rota criada na Cluster 2 (Rota 75) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação

Como podemos observar a partir da leitura da tabela 28, este algoritmo produziu 17 rotas. Desta optimização resultou uma distância percorrida de 1683263 Mt, recolhendo 180042 L (visitando 291 clientes) em 3519 Min.



Ilustração 27 - Representação geográfica (Rota 75) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação - Cluster 2

Na tabela 29 e na ilustração 2 está representada, com detalhe e a título exemplificativo, uma das rotas criadas por este algoritmo no cluster 2 (a “rota 75”). Ao analisar a tabela 28, verificamos que foram recolhidos 10674 L de mercadoria em 215 Min (160+55), percorrendo um distância de 218622 Mt..

5.3.3 – Cluster 3

5.3.3.1 - Heurística de Clarke & Wright – Cluster 3

Rotas criadas						
Rota	Código do Veículo	Capacidade do veículo (L)	Tempo de carga (Min)	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
5	17_1	22200	56	261	20832	190190
10	20_1	16600	26	243	8845	257995
7	20_3	16600	46	264	9126	223267
13	20_4	16600	33	219	12100	185800
23	43_1	30000	75	269	28168	198469
11	43_2	30000	69	266	26078	228498
			305	1522	105149	1284219

Cientes no “Estado inicial”

Ligação	Quantidade recolhida (L)	Tempo Total (Min)	Distancia percorrida (Mt)
0_3	0	54	80580
3_0	18293	55	41645
Total	18293	109	122225
Ligação	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Distancia percorrida (Mt)
0_6	0	103	147143
6_0	6393	148	228946
Total	6393	251	376089

	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
Total da Cluster	1882	129835	1782533

Tabela 30 - Resultados da Heurística de Clarke & Wright com alocação – Cluster 3

Como podemos observar a partir da leitura da tabela 30, a heurística de Clarke & Wright produziu 8 rotas. Desta optimização resultou uma distância percorrida de 1782533 Mt, recolhendo 129835 L (visitando 36 clientes) em 1822 Min. O algoritmo não conseguiu alocar todos os clientes a uma rota, ficando os clientes 3 e 6 ligados directamente ao depósito e ao estacionamento.

5.3.3.2 - Algoritmo de 2ª Ordem – Cluster 3

Rotas criadas

Rota	Código do Veículo	Capacidade do veículo (L)	Tempo de carga (Min)	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
23	43_1	30000	75	269	28168	198469
2	20_1	16600	46	264	9126	223247
10	20_2	16600	26	243	8845	257995
13	20_4	16600	33	219	12100	185800
5	17_1	22200	56	261	20832	190190
11	43_2	30000	69	266	26078	228498
Total			305	1522	105149	1284199

Cientes no “Estado inicial”

Ligação	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Distancia percorrida (Mt)
0_3	0	54	80580
3_0	18293	55	41645
Total	18293	109	122225
Ligação	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Distancia percorrida (Mt)
0_6	0	103	147143
6_0	6393	148	228946
Total	6393	251	376089

	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
Total da Cluster	1882	129835	1782513

Tabela 31 - Resultados do Algoritmo de 2ª Ordem com alocação - Cluster 3

Como podemos observar a partir da leitura da tabela 31, este algoritmo produziu 8 rotas. Desta optimização resultou uma distância percorrida de 1782513 Mt, recolhendo 129835 L (visitando 36 clientes) em 1882 Min. Os clientes 6 e 3 ficaram ligados directamente ao estacionamento e ao depósito.

Solução no mapa	Ligação	Rota	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Tempo de carga (Min)	Distancia percorrida (Mt)
	0_17	23	0	65	0	107366
1	17_1	23	1211	22	4	17475
2	1_23	23	1810	14	6	8692
3	23_29	23	1071	5	4	1715
4	29_35	23	837	16	3	10874
5	35_33	23	401	36	2	24693
6	33_0	23	22838	36	56	27654
Total			28168	194	75	198469

Tabela 32 - Exemplo de rota criada na Cluster 3 (Rota 23) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação



Ilustração 28 - Representação geográfica - (Rota 23) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação- Cluster 3

Na tabela 32 e na ilustração 28 está representada, com detalhe e a título exemplificativo, uma das rotas criadas por este algoritmo no cluster 3 (a “rota 23”). Ao analisar a tabela 32, verificamos que foram recolhidos 28168 L de mercadoria em 269 Min (194+75), percorrendo um distância de 198469 Mt..

5.3.4 – Cluster 4

5.3.4.1 - Heurística de Clarke & Wright – Cluster 4

Rotas criadas

Rota	Código do Veículo	Capacidade do veículo (L)	Tempo de carga (Min)	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
4	20_1	16600	12	206	3879	248513
1	20_2	16600	49	201	15239	112014
Total			61	407	19118	360527

Cientes no “Estado inicial”

Ligação	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Distancia percorrida (Mt)
0_10	0	55	59813
10_0	2075	55	69275
Total	2075	110	129088

	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
Total da Cluster	517	21193	489615

Tabela 33 - Resultados da Heurística de Clarke & Wright com alocação – Cluster 4

Como podemos observar a partir da leitura da tabela 33, a heurística de Clarke & Wright produziu 3 rotas. Desta optimização resultou uma distância percorrida de 489615 Mt, recolhendo 21193 L (visitando 11 clientes) em 517 Min. O algoritmo não conseguiu alocar todos os clientes a uma rota, ficando portanto o cliente 10 ligado directamente ao depósito e ao estacionamento.

5.3.4.2 - Algoritmo de 2ª Ordem – Cluster 4

Rotas criadas

Rota	Código do Veículo	Capacidade do veículo (L)	Tempo de carga (Min)	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
4	20_1	16600	12	206	3879	248513
1	20_2	16600	49	201	15239	112014
Total			61	407	19118	360527

Cientes no “Estado inicial”

Ligação	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Distancia percorrida (Mt)
0_10	0	55	59813
10_0	2075	55	69275
Total	2075	110	129088

	Tempo total (Min)	Volume de carga (L)	Distancia percorrida (Mt)
Total da Cluster	517	21193	489615

Tabela 34 - Resultados do Algoritmo de 2ª Ordem com alocação - Cluster 4

Como podemos observar a partir da leitura da tabela 34, este algoritmo produziu 3 rotas. Desta optimização resultou uma distância percorrida de 489615 Mt, recolhendo 21193 L (visitando 11 clientes) em 517 Min. O algoritmo não conseguiu alocar todos os clientes a uma rota, ficando portanto o cliente 10 ligado directamente ao depósito e ao estacionamento.

Solução no mapa	Ligação	Rota	Quantidade recolhida (L)	Tempo de viagem (Min)	Tempo de carga (Min)	Distancia percorrida (Mt)
	0_11	1	0	24	0	17476
1	11_2	1	2722	38	8	38029
2	2_1	1	1907	10	6	5891
3	1_3	1	2310	3	7	574
4	3_7	1	5209	13	15	7154
5	7_8	1	776	8	3	2879
6	8_9	1	1024	6	4	2773
7	9_6	1	986	24	4	15408
8	6_0	1	305	26	2	21830
Total			15239	152	49	112014

Tabela 35 - Exemplo de rota criada na Cluster 4 (Rota 1) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação



Ilustração 29 - Representação geográfica – (Rota 1) – Algoritmo de 2ª Ordem com alocação - Cluster 4

Na tabela 35 e na ilustração 29 está representada, com detalhe e a título exemplificativo, a única rota criada por este algoritmo no cluster 4 (a “rota 1”). Ao analisar a tabela 35, verificamos que foram recolhidos 15239 L de mercadoria em 201 Min (152+49), percorrendo um distância de 152446 Mt..

5.4 - Análise e comparação de resultados

Neste capítulo são resumidos os resultados de todas as metodologias de optimização de rotas enunciadas anteriormente (excepto a metodologia exacta, porque a solução óptima está presente, para a zona 4, na solução da heurística de Clarke & Wright e na solução do Algoritmo de 2ª Ordem).

Heurística de Clarke & Wright						
	Volume de carga (L)	Tempo Total (Min)	Distância (Mt)	Nº de Clientes	Número de rotas criadas	Tempo de Resolução (s)
Zona 1	53361	3035	2078850	146	12	0.569514009
Zona 2	167822	3309	1576703	290	17	0.754424035
Zona 3	126737	1653	1427126			
	11843	72	101005			
Total Zona	138580	1725	1528131	43	8	0.00486818

Optimização de rotas na recolha de leite

3						1
Zona 4	5954	270	310690			
	7114	89	68048			
	6393	218	290862			
Total Zona 4	19461	577	669600	5	3	9.547E-5
Total	379224	8685	5853284	484	40	

Tabela 36 - Resumo de resultados: Heurística de Clarke & Wright

Na tabela 36 estão presentes os resultados resumidos para todas as zonas, utilizando a heurística de Clarke & Wright (resultados dos pontos 5.2.2.1, 5.2.3.1, 5.2.4.1 e 5.2.5.1). O tempo de resolução total da heurística de Clarke & Wright foi, para o caso das zonas 1 e 2 inferior a 1 segundo, inferior a 0.001 segundos para a zona 3 e inferior a 1E-4 segundos para a zona 4. A distância percorrida foi de 5853284 Mt. em 8685 Min.

Algoritmo de 2ª Ordem							
	Volume de carga (L)	Tempo Total (Min)	Distância (Mt)	Nº de Clientes	Número de rotas criadas	Número de iterações do algoritmo	Tempo de Resolução (s)
Zona 1	53361	2850	1923777	146	11	1887	546
Zona 2	167822	3263	1479000	290	16	7671	6496
Zona 3	126737	1618	1370054				
	11843	72	101005				
Total Zona 3	138580	1690	1471059	43	8	176	26
Zona 4	5954	270	310690				
	7114	89	68048				
	6393	218	290862				
Total Zona 4	19461	577	669600	5	3	1	9.778E-5
Total	379224	8380	5543436	484	38	9725	7168

Tabela 37 - Resumo de resultados: Algoritmo de 2ª Ordem

A tabela 37 apresenta um resumo de resultados do Algoritmo de 2ª ordem (dos resultados dos pontos 5.2.2.2, 5.2.3.2, 5.2.4.2 e 5.2.5.2). É importante referir que foi colocado um limite suficientemente grande no número de iterações (neste caso 100000), para que o algoritmo de 2ª ordem terminasse apenas quando o óptimo local se degradasse. Esta metodologia conseguiu resolver todos os problemas em 7168 segundos (1 hora, 59 minutos e 28 segundos). A Zona 2 foi aquela que levou mais tempo a resolver (6496 segundos, ou seja 1 hora, 48 minutos e 16 segundos) e que mais vezes recorreu aa heurística de Clarke & Wright (7671 iterações) para resolução de subproblemas. A distância percorrida foi de 5543436 Mt. em 8380 Min..

Heurística de Clarke & Wright com alocação						
	Volume de carga (L)	Tempo Total (Min)	Distância (Mt)	Nº de Clientes	Número de rotas criadas	Tempo de Resolução (s)
Total Cluster 1	48154	2976	2038910	146	12	0.4844137 23
Total Cluster 2	180042	3540	1732919	291	18	0.3606589 43
Cluster 3	105149	1522	1284219			
	6393	251	376089			
	18293	109	122225			
Total Cluster 3	129835	1882	1782533	36	8	0.0358531 71
Cluster 4	19118	407	360527			
	2075	110	129088			
Total Cluster 4	21193	517	489615	11	3	0.0011898 83
Total	379224	8915	6043977	484	41	

Tabela 38 - Resumo de resultados: heurística de Clarke & Wright com alocação

Na tabela 38 estão presentes os resultados resumidos para todas as zonas, utilizando a heurística de Clarke & Wright com alocação (resultados dos pontos 5.3.1.1, 5.3.2.1, 5.3.3.1 e 5.3.4.1). O tempo de resolução total da heurística de Clarke & Wright foi, para o caso dos clusters 1 e 2, inferior a 1 segundo, inferior a 0.1 segundos para a zona 3 e inferior a 0,01 segundos para a zona 4. A solução indica uma distância total percorrida de 6043977 Mt. em 8915 Min.

Algoritmo de 2ª Ordem com alocação							
	Volume de carga (L)	Tempo Total (Min)	Distância (Mt)	Nº de Clientes	Número de iterações do algoritmo	Número de rotas criadas	Tempo de resolução (s)
Total Cluster 1	48154	2845	1894883	146	1215	11	344
Total Cluster 2	180042	3519	1683263	291	6027	17	4807
Cluster 3	18293	109	122225				
	6393	251	376089				
	105149	1522	1284199				
Total Cluster 3	129835	1882	1782513	36	57	8	8

Cluster 4	2075	110	129088				
	19118	407	360527				
Total Cluster 4	21193	517	489615	11	1	3	0.001189883
Total	379224	8763	5850274	484	7300	39	5159

Tabela 39 - Resumo de resultados: Algoritmo de 2ª Ordem com alocação

A tabela 39 apresenta um resumo de resultados do Algoritmo de 2ª ordem com alocação (dos resultados dos pontos 5.3.1.2, 5.3.2.2, 5.3.3.2 e 5.3.4.2). É importante referir que foi colocado um limite suficientemente grande no número de iterações (neste caso 100000), para que o algoritmo de 2ª ordem terminasse apenas quando o óptimo local se degradasse. Esta metodologia conseguiu resolver todos os problemas em 5159 segundos (1 hora, 25 minutos e 59 segundos). A Zona 2 foi aquela que levou mais tempo a resolver (4807 segundos, ou seja 1 hora, 20 minutos e 59 segundos) e que mais vezes recorreu aa heurística de Clarke & Wright (6027 iterações) para resolução de subproblemas. A distância percorrida foi de 5850274 Mt. em 8763 Min..

Na tabela 39 estão presentes os resultados resumidos para todas as zonas, utilizando o Algoritmo de 2ª Ordem com alocação.

	Distancia total percorrida (Mt.) ↓	Número de rotas necessárias
Rotas originais	6355830	49
Heurística de Clarke & Wright com alocação	6043977	41
Heurística de Clarke & Wright	5853284	40
Algoritmo de 2ª Ordem e alocação	5850274	39
Algoritmo de 2ª Ordem	5543436	38

Tabela 40 - Resumo de resultados

A tabela 40 é um resumo das tabelas 36, 37, 38 e 39, apresentando apenas os valores mais relevantes para a análise da variação dos custos da empresa.

Como podemos observar, todas as metodologias utilizadas neste trabalho conseguiram reduzir as distâncias percorridas relativamente às rotas originais. O Algoritmo de 2ª ordem foi a metodologia que obteve os valores mais baixos, quer em termos de distância total percorrida, quer no número de rotas obtidas. A redução da distância percorrida é analisada na tabela 41. Em relação à diminuição do número de rotas necessárias, podemos referir que é um factor de custo que não vamos contabilizar nesta análise, mas que pode ter muita relevância nos custos da empresa (a empresa não disponibilizou dados relativamente ao salário dos condutores, por considerar esta informação como confidencial). A diminuição de 11 (49-38=11) rotas diárias poderá obrigar a uma revisão da política em termos de recursos humanos (condutores das viaturas de recolha) da empresa. Se esta revisão for tida em conta, poderá reflectir-se nos custos operacionais da empresa.

	Rotas originais		
	Varição da distância percorrida (Mt)	% Variação	Poupança monetária total diária (€) (0,70 € \ Km)
Heurística de Clarke & Wright	-502546	-8,59%	351,78 €
Algoritmo de 2ª Ordem	-812394	-14,66%	568,68 €
Heurística de Clarke & Wright com alocação	-311853	-5,16%	218,30 €
Algoritmo de 2ª Ordem com alocação	-505556	-8,64%	353,89 €

Tabela 41 – Comparação de resultados relativamente às rotas originais

A tabela 41 mostra a variação de distâncias percorridas nas rotas criadas pelos algoritmos, comparativamente com as rotas originais existentes na empresa, à data da recolha dos dados utilizados no presente trabalho.

A primeira linha da tabela 41, “Variação da distância percorrida”, foi calculada subtraindo as distâncias totais percorridas presentes na tabela 29 pela distância total percorrida nas “rotas originais” (existentes na empresa quando forma recolhidos os dados desta tese).

A segunda linha da Tabela 41, “% Variação”, foi calculada subtraindo a distância total percorrida da metodologia em causa, pelo valor da distância total percorrida nas “rotas originais”, e dividindo esta subtração pelo primeiro valor.

A última linha da tabela 41 (“Diferença monetária total diária”) foi calculada reduzindo a “Variação da distância percorrida” para Km, de forma a este valor poder ser multiplicado pelo custo médio de cada viatura por Km. Como referido anteriormente no ponto 3.4-“Veículos”, o custo médio de cada viatura por Km é de 0,70 €.

Dos resultados conseguidos, presentes na tabela 41, é importante destacar o resultado obtido utilizando o “Algoritmo de 2ª Ordem”. Na conjuntura verificada (quando os dados deste trabalho foram recolhidos), comparando a solução obtida pelo algoritmo com a solução real praticada pela empresa, haveria uma poupança diária de 568,68 € em despesas com combustível e manutenção dos veículos, correspondente a uma redução de 14.66 % da distância total percorrida.

A partir da leitura da tabela 42 podemos tirar algumas conclusões, como por exemplo:

- A partir da partição de zonas em prática pela empresa (zonas iniciais) foram conseguidos melhores resultados quando comparados com as soluções geradas a partir dos clusters gerados pelo problema de alocação (descrito na secção 5.2);
- O Algoritmo de 2ª Ordem foi a metodologia que conseguiu obter menores distâncias percorridas, melhorando a solução inicial gerada pelo algoritmo de Clarke & Wright em 5.59% (no caso da partição de zonas definida pela empresa) e em 3.20% (para o caso da partição de zonas calculadas a partir da solução do problema de alocação descrita na secção 5.2);

	Distancia total percorrida (Mt)	Heurística de Clarke & Wright		Algoritmo de 2ª Ordem		Heurística de Clarke & Wright com alocação		Algoritmo de 2ª Ordem com alocação	
		Δ	%	Δ	%	Δ	%	Δ	%
Heurística de Clarke & Wright	5853284			309848	5,29%	-190693	-3,26%	3010	0,05%
Algoritmo de 2ª Ordem	5543436	-309848	-5,59%			-500541	-9,03%	-306838	-5,54%
Heurística de Clarke & Wright com alocação	6043977	190693	3,16%	500541	8,28%			193703	3,20%
Algoritmo de 2ª Ordem com alocação	5850274	-3010	-0,05%	306838	5,24%	-193703	-3,31%		

Tabela 42 - Tabela comparativa entre as metodologias de optimização

A tabela 42 mostra-nos uma análise comparativa entre as diferentes metodologias utilizadas no trabalho. O algoritmo de 2ª ordem melhora a solução da heurística de Clarke & Wright em 5.29 % (célula a vermelho) no caso dos clusters iniciais, e em 3.20 % (célula a verde) no caso dos clusters calculados. Os novos clusters calculados pioram os resultados em 3.26 % (célula a castanho), para o caso do heurística de Clarke & Wright, e em 5.54 % (célula a azul), para o caso do algoritmo de 2ª ordem.

6 - Estudo computacional

6.1 - Hardware utilizado para resolução do problema

Sistema operativo: Windows 7 Home Premium com Service pack 1 de 64 bits.

Fabricante: Smasung Electronics.

Processador: Intel® Core™ i5 CPU M480 @ 2,67Ghz 2,67Ghz.

Memória ram instalada: 4,00 GB (3,86 GB utilizável).

6.2 - Software utilizado para resolução do problema - a aplicação Eclipse

A aplicação java foi desenvolvida somente com o recurso a freeware:

- Eclipse Java EE IDE for Web Developers:
 - Version: Juno Release
 - Build id: 20120614-1722
 - (c) Copyright Eclipse contributors and others 2005, 2012. All rights reserved.
 - <http://www.eclipse.org/webtools>

Com as bibliotecas:

- Java Excel API – Uma aplicação java para ler, escrever e modificar folhas de Excel (apenas em formato 97-2003 (xls).
 - <http://jexcelapi.sourceforge.net/>
- Ip_solve 5.5 – Solver do java (versão de 64 bits)
 - <http://lpsolve.sourceforge.net/>

7 - Conclusões e Perspectivas de Trabalho Futuro

Neste último capítulo são apresentadas algumas conclusões relativas às discussões conduzidas nos capítulos anteriores, assim como as conclusões finais sobre o estágio e *software* desenvolvido. Serão também feitas algumas considerações pessoais, além de considerações referentes ao decurso do trabalho.

7.1 - Principais Conclusões do Trabalho Desenvolvido

O trabalho desenvolvido no estágio focou a criação de um sistema de optimização de rotas de veículos para a empresa Lacticoop. Este estágio teve três grandes fases:

- O estudo do processo de recolha de leite na empresa e recolha de dados;
- Pesquisa bibliográfica e desenvolvimento de uma aplicação Java para optimização de rotas;
- A elaboração do presente documento;

Foi proposta uma metodologia exacta, baseada numa formulação em programação linear inteira mista assim como técnicas aproximativas baseadas na heurística *greedy* de Clarke & Wright e num algoritmo de pesquisa local. Tratando-se de um problema pertencente à classe do NP-difíceis, a resolução dos casos aplicados em uso na empresa obrigaram à utilização das técnicas aproximativas, devido à dimensão dos problemas envolvidos. Só assim foi possível obter alguns resultados interessantes e que poderão trazer alguns benefícios à empresa, nomeadamente em relação à diminuição das distâncias percorridas pelos veículos de recolha.

Da totalidade dos resultados analisados e discutidos no capítulo 5, é de especial relevância comparar os resultados para a Zona 4, utilizando a heurística de Clarke & Wright (ponto 5.2.5.1) e a metodologia exacta (no ponto 5.2.1). Da comparação das soluções obtidas pelas duas metodologias, e considerando a partição dos clientes de acordo com o cluster inicial, mostra que a heurística de Clarke & Wright conseguiu atingir a solução óptima neste cluster.

Como seria de esperar, o algoritmo de 2ª Ordem melhora substancialmente as soluções obtidas pela heurística de Clarke & Wright, diminuindo a distância percorrida em 5,59% e diminuindo o número de saída de veículos. Este facto permite à empresa diminuir custos com combustível e desgaste das viaturas. Além disso permite também uma possível diminuição na utilização de recursos humanos.

As tecnologias que foram utilizadas revelaram-se adequadas à solução proposta. Existem porém um conjunto de melhoramentos que poderão ser aplicados ao estudo aqui conduzido e ao sistema de informação desenvolvido, tal com o serão evidenciados na secção de Perspectivas futuras.

Numa análise do ponto de vista do estágio, podemos concluir que:

- Durante o processo de recolha de dados e do estudo do funcionamento da empresa ficou patente a complexidade do processo de recolha de leite, devido ao número de restrições a implementar no modelo;
- Na primeira fase do trabalho foi realizado um inquérito aos produtores que pode servir de base à renegociação das janelas de recolha, com reflexo numa nova abordagem do problema;
- Pelo facto de estarmos a lidar com uma mercadoria perecível e de grande consumo, existem condicionalismos na recolha de leite, como por exemplo a obrigatoriedade de recolhas com frequência diária;

- A incerteza quanto aos níveis de matéria-prima a recolher nos produtores e a entregar nas fábricas de laticínios, são outro problema que obriga à frequente actualização das rotas;
- Outro aspecto a ter em conta é a pequena dimensão dos produtores, o que aumenta a dimensão do problema e cria constrangimentos ao nível da frota a utilizar nesses locais;
- Por todos estes constrangimentos, foi desenvolvida uma aplicação informática baseada em heurísticas de forma a ir de encontro às necessidades da empresa;
- Este programa não pode ser utilizado para substituir o responsável da gestão de rotas. A sua utilização deve servir como ferramenta de apoio ao processo de decisão, devendo sempre ser supervisionada pelo responsável desta área;

7.2 - Perspectivas Futuras

Seria interessante testar este problema com outros algoritmos ou metaheurísticas descritas na literatura, nomeadamente, em:

- a. - algoritmos de pesquisa local (Irnich et al. (2006)) e Lourenço et al. (2003)
- b. - algoritmos de pesquisa tabu (Dammeyer and Voß (1993))
- c. - algoritmos de Variable Neighborhood Search (VNS) (Hansen et al. (2009))
- d. - algoritmos GRASP (Festa and Resende (2009))
- e. algoritmos genéticos (Battarra et al. (2006))

Outro aspecto interessante de introduzir nas opções do *software* seriam as janelas de tempo admissíveis para recolha de leite. É possível introduzir esta restrição na heurística de Clarke & Wright (Bräysy and Gendreau (2005)).

Seria também uma mais-valia o planeamento da alocação dos veículos aos estacionamentos (Magnanti (1981)), e ver os resultados práticos na constituição das novas rotas e clusters.

Outro planeamento que poderia trazer alguns benefícios ao funcionamento da empresa era o planeamento das escalas de trabalho para os condutores dos veículos de recolha (Caprara et al. (2003)).

Finalmente, para diminuir o tempo de resolução do algoritmo de 2ª Ordem, otimizar o código em Java. Para além da optimização do código, seria também interessante o desenvolvimento da parte gráfica do *software*, permitindo ao utilizador um interface mais *user-friendly*.

7.3 - Considerações Pessoais

Em primeiro lugar gostava de afirmar que a realização do presente estágio foi uma experiência muito gratificante, elevada importância e que me enriqueceu, quer a nível pessoal, quer a nível profissional. Foi uma oportunidade única de conhecer o “mundo real” da engenharia informática e da recolha de leite.

Com este estágio tive a excelente oportunidade de trabalhar numa empresa com a dimensão e a história da Lacticoop. A complexidade, a exigência e o desconhecimento de áreas-chave como os algoritmos de programação, obrigaram-me a esforços redobrados, que nunca seriam ultrapassados sem a experiência e o apoio do meu orientador (docente do ISCAC) e do meu co-orientador (CEO da empresa Widescope).

Gostaria de destacar o bom ambiente de equipa e camaradagem vivido nas empresas onde estagiei, existindo apoio e entreaajuda entre os vários colaboradores, ambiente no qual fui bem recebido e deixei alguns amigos.

Graças a ter estagiado nestas empresas tive o privilégio de concretizar uma ambição pessoal e profissional: aprender a conceber e desenvolver um sistema de informação que tivesse resultados práticos ao nível da gestão. Fico bastante satisfeito por ajudar (pelo menos tentar) uma das empresas que é um “pilar” na criação de emprego na minha freguesia.

8 - Anexos

Anexo 1 - Questionário aos produtores (exemplar):

Para: «Nome_de_Produtor»

Número: «Código»

Localidade: «Localidade»

Volta Nº: «Volta_nº»



Estimado Produtor

No seguimento de um trabalho académico desenvolvido pelo estagiário Óscar Rodrigues de Oliveira Pereira na empresa Lacticoop – União de Cooperativas de Produtores de Leite entre Douro e Mondego UCRL, promovemos, por este meio, um breve questionário acerca do horário da ordenha a todos os produtores:

Ordenha da manhã:

Início: ____ h ____ m ; Fim: ____ h ____ m

Ordenha da tarde:

Início: ____ h ____ m ; Fim: ____ h ____ m

Terceira ordenha (se existir):

Início: ____ h ____ m ; Fim: ____ h ____ m

Este documento será entregue e recolhido pelos nossos motoristas, não sendo portanto necessário enviar via CTT.

Agradecemos a sua compreensão e disponibilidade.

Óscar Rodrigues de Oliveira Pereira

Estagiário da empresa

Lacticoop

12-12-2011

Anexo 2 - Lista de veículos

Código	MATRICULA	MARCA	MODELO	P. BRUTO	CAP. REAL	LOCAL C.	Nº Eixos	Capacidade da bomba /minuto
17	43-54-VM	MAN	TGA 35.363	32000	22200	SUL	4	400
19	43-57-VM	MAN	TGA 35.363	32000	22200	SUL	4	400
20	43-58-VM	MAN	TGA 26.313	26000	16600	SUL	3	400
21	43-59-VM	MAN	TGA 26.313	26000	16600	LITORAL	3	400
22	43-60-VM	MAN	TGA 35.363	32000	24500	SUL	4	400
29	L-172037	PARCISA	S.REBOQUE	34000	30000	SUL	3	420
40	00-50-ZU	MAN	TGA 26.310	26000	16600	LITORAL	3	400
41	00-54-ZU	MAN	TGA 26.310	26000	16600	LITORAL	3	400
42	00-55-ZU	MAN	TGA 26.310	26000	16600	LITORAL	3	400
43	AV-40817	PARCISA	S.REBOQUE	35000	30000	SUL	3	420
70	46-BF-39	MAN	TGA 35.350	32000	22200	SUL	4	400
71	46-BF-40	MAN	TGA 26.310	26000	16600	LITORAL	3	400
72	46-BF-41	MAN	TGA 26.310	26000	16600	LITORAL	3	400
163	10-HG-72	MAN	TGA 35.360	32000	22200	SUL	3	400
195	AV-47952	PARCISA	S.REBOQUE	35000	25000	SUL	2	800
639	56-87-EI	IVECO	MT190E27	19000	10750	INTERIOR	2	233
640	56-88-EI	IVECO	MT190E27	19000	10750	INTERIOR	2	233
641	56-89-EI	IVECO	MT190E27	19000	10750	INTERIOR	2	233
642	73-23-ES	IVECO	MT190E27	19000	10750	LITORAL	2	233
643	73-22-ES	IVECO	MT190E27	19000	10750	INTERIOR	2	233
645	71-22-EI	IVECO	MT190E24	19000	10250	INTERIOR	2	333
646	76-79-ET	IVECO	MT190E24	19000	10250	INTERIOR	2	233
652	57-66-ER	VOLVO	FS 720	19000	10250	INTERIOR	2	333
653	57-67-ER	VOLVO	FS 720	19000	10250	INTERIOR	2	333
655	57-69-ER	VOLVO	FS 720	19000	10250	INTERIOR	2	333
731	66-87-NN	MAN	TGA 18.284	19000	10250	LITORAL	2	333
732	66-81-NN	MAN	TGA 18.284	19000	10250	LITORAL	2	333
733	80-73-NU	IVECO	MT190E24	19000	10250	INTERIOR	2	333
734	47-74-OG	VOLVO	FM 7- 46	19000	10250	LITORAL	2	333
736	47-76-OG	VOLVO	FM12	19000	10250	INTERIOR	2	333
745	52-83-PS	VOLVO	FM12	32000	20250	LITORAL	4	400

Anexo 3 - Função objetivo da metodologia exacta: Zona 4

Problema: Minimize

139892*x_3603501_3659510_20_1 + 117214*x_3603501_3659512_20_1 + 270431*x_3603501_3672520_20_1 + 46114*x_3603501_3688535_20_1 + 139892*x_3659510_3603501_20_1 + 52662*x_3659510_3659512_20_1 + 135681*x_3659510_3672520_20_1 + 73876*x_3659510_3688535_20_1 + 117214*x_3659512_3603501_20_1 + 52662*x_3659512_3659510_20_1 + 137013*x_3659512_3672520_20_1 + 56790*x_3659512_3688535_20_1 + 270431*x_3672520_3603501_20_1 + 135681*x_3672520_3659510_20_1 + 137013*x_3672520_3659512_20_1 + 211658*x_3672520_3688535_20_1 + 46114*x_3688535_3603501_20_1 + 73876*x_3688535_3659510_20_1 + 56790*x_3688535_3659512_20_1 + 211658*x_3688535_3672520_20_1 + 139892*x_3603501_3659510_17_1 + 117214*x_3603501_3659512_17_1 + 270431*x_3603501_3672520_17_1 + 46114*x_3603501_3688535_17_1 + 139892*x_3659510_3603501_17_1 + 52662*x_3659510_3659512_17_1 + 135681*x_3659510_3672520_17_1 + 73876*x_3659510_3688535_17_1 + 117214*x_3659512_3603501_17_1 + 52662*x_3659512_3659510_17_1 + 137013*x_3659512_3672520_17_1 + 56790*x_3659512_3688535_17_1 + 270431*x_3672520_3603501_17_1 + 135681*x_3672520_3659510_17_1 + 137013*x_3672520_3659512_17_1 + 211658*x_3672520_3688535_17_1 + 46114*x_3688535_3603501_17_1 + 73876*x_3688535_3659510_17_1 + 56790*x_3688535_3659512_17_1 + 211658*x_3688535_3672520_17_1 + 139892*x_3603501_3659510_19_1 + 117214*x_3603501_3659512_19_1 + 270431*x_3603501_3672520_19_1 + 46114*x_3603501_3688535_19_1 + 139892*x_3659510_3603501_19_1 + 52662*x_3659510_3659512_19_1 + 135681*x_3659510_3672520_19_1 + 73876*x_3659510_3688535_19_1 + 117214*x_3659512_3603501_19_1 + 52662*x_3659512_3659510_19_1 + 137013*x_3659512_3672520_19_1 + 56790*x_3659512_3688535_19_1 + 270431*x_3672520_3603501_19_1 + 135681*x_3672520_3659510_19_1 + 137013*x_3672520_3659512_19_1 + 211658*x_3672520_3688535_19_1 + 46114*x_3688535_3603501_19_1 + 73876*x_3688535_3659510_19_1 + 56790*x_3688535_3659512_19_1 + 211658*x_3688535_3672520_19_1 + 139892*x_3603501_3659510_20_2 + 117214*x_3603501_3659512_20_2 + 270431*x_3603501_3672520_20_2 + 46114*x_3603501_3688535_20_2 + 139892*x_3659510_3603501_20_2 + 52662*x_3659510_3659512_20_2 + 135681*x_3659510_3672520_20_2 + 73876*x_3659510_3688535_20_2 + 117214*x_3659512_3603501_20_2 + 52662*x_3659512_3659510_20_2 + 137013*x_3659512_3672520_20_2 + 56790*x_3659512_3688535_20_2 + 270431*x_3672520_3603501_20_2 + 135681*x_3672520_3659510_20_2 + 137013*x_3672520_3659512_20_2 + 211658*x_3672520_3688535_20_2 + 46114*x_3688535_3603501_20_2 + 73876*x_3688535_3659510_20_2 + 56790*x_3688535_3659512_20_2 + 211658*x_3688535_3672520_20_2 + 139892*x_3603501_3659510_17_2 + 117214*x_3603501_3659512_17_2 + 270431*x_3603501_3672520_17_2 + 46114*x_3603501_3688535_17_2 + 139892*x_3659510_3603501_17_2 + 52662*x_3659510_3659512_17_2 + 135681*x_3659510_3672520_17_2 + 73876*x_3659510_3688535_17_2 + 117214*x_3659512_3603501_17_2 + 52662*x_3659512_3659510_17_2 + 137013*x_3659512_3672520_17_2 + 56790*x_3659512_3688535_17_2 + 270431*x_3672520_3603501_17_2 + 135681*x_3672520_3659510_17_2 + 137013*x_3672520_3659512_17_2 + 211658*x_3672520_3688535_17_2 + 46114*x_3688535_3603501_17_2 + 73876*x_3688535_3659510_17_2 + 56790*x_3688535_3659512_17_2 + 211658*x_3688535_3672520_17_2 + 139892*x_3603501_3659510_19_2 + 117214*x_3603501_3659512_19_2 + 270431*x_3603501_3672520_19_2 + 46114*x_3603501_3688535_19_2 + 139892*x_3659510_3603501_19_2 + 52662*x_3659510_3659512_19_2 + 135681*x_3659510_3672520_19_2 + 73876*x_3659510_3688535_19_2 + 117214*x_3659512_3603501_19_2 + 52662*x_3659512_3659510_19_2 + 137013*x_3659512_3672520_19_2 + 56790*x_3659512_3688535_19_2 + 270431*x_3672520_3603501_19_2 + 135681*x_3672520_3659510_19_2 + 137013*x_3672520_3659512_19_2 + 211658*x_3672520_3688535_19_2 + 46114*x_3688535_3603501_19_2 + 73876*x_3688535_3659510_19_2 + 56790*x_3688535_3659512_19_2 + 211658*x_3688535_3672520_19_2 + 136541*x_Estac._3603501_20_1 + 136495*x_3603501_Depot_20_1 + 136541*x_Estac._3603501_17_1 + 136495*x_3603501_Depot_17_1 + 136541*x_Estac._3603501_19_1 + 136495*x_3603501_Depot_19_1 + 136541*x_Estac._3603501_20_2 + 136495*x_3603501_Depot_20_2 + 136541*x_Estac._3603501_17_2 + 136495*x_3603501_Depot_17_2 + 136541*x_Estac._3603501_19_2 + 136495*x_3603501_Depot_19_2 + 40475*x_Estac._3659510_20_1 + 27573*x_3659510_Depot_20_1 + 40475*x_Estac._3659510_17_1 + 27573*x_3659510_Depot_17_1 + 40475*x_Estac._3659510_19_1 + 27573*x_3659510_Depot_19_1 + 40475*x_Estac._3659510_20_2 + 27573*x_3659510_Depot_20_2 + 40475*x_Estac._3659510_17_2 + 27573*x_3659510_Depot_17_2 + 40475*x_Estac._3659510_19_2 + 27573*x_3659510_Depot_19_2 + 69016*x_Estac._3659512_20_1 + 65705*x_3659512_Depot_20_1 + 69016*x_Estac._3659512_17_1 + 65705*x_3659512_Depot_17_1 + 69016*x_Estac._3659512_19_1 + 65705*x_3659512_Depot_19_1 + 69016*x_Estac._3659512_20_2 + 65705*x_3659512_Depot_20_2 + 69016*x_Estac._3659512_17_2 + 65705*x_3659512_Depot_17_2 + 69016*x_Estac._3659512_19_2 + 65705*x_3659512_Depot_19_2 + 147256*x_Estac._3672520_20_1 + 143606*x_3672520_Depot_20_1 + 147256*x_Estac._3672520_17_1 + 143606*x_3672520_Depot_17_1 + 147256*x_Estac._3672520_19_1 + 143606*x_3672520_Depot_19_1 + 147256*x_Estac._3672520_20_2 + 143606*x_3672520_Depot_20_2 + 147256*x_Estac._3672520_17_2 + 143606*x_3672520_Depot_17_2 + 147256*x_Estac._3672520_19_2 + 143606*x_3672520_Depot_19_2 + 81657*x_Estac._3688535_20_1 + 81294*x_3688535_Depot_20_1 + 81657*x_Estac._3688535_17_1 + 81294*x_3688535_Depot_17_1 + 81657*x_Estac._3688535_19_1 + 81294*x_3688535_Depot_19_1 + 81657*x_Estac._3688535_20_2 + 81294*x_3688535_Depot_20_2 + 81657*x_Estac._3688535_17_2 + 81294*x_3688535_Depot_17_2 + 81657*x_Estac._3688535_19_2 + 81294*x_3688535_Depot_19_2

Anexo 4 - Distâncias percorridas: Zona 1 (primeiro semestre de 2011)

Ligação	Zona	Volta	Distância (Mt)	Quantidade (L)
Estac. 2855043 (131)	1	801	43574	0
2855043 (131)_2855007 (127)	1	801	12107	12
2855007 (127)_2855504 (132)	1	801	3429	37
2855504 (132)_2855041 (130)	1	801	4430	82
2855041 (130)_2855022 (129)	1	801	2427	44
2855022 (129)_2855506 (133)	1	801	7555	72
2855506 (133)_2355505 (106)	1	801	2211	468
2355505 (106)_2855001 (125)	1	801	13382	37
2855001 (125)_2855008 (128)	1	801	4325	62
2855008 (128)_2349509 (102)	1	801	4548	99
2349509 (102)_2349512 (104)	1	801	629	180
2349512 (104)_2349514 (105)	1	801	1070	31
2349514 (105)_2349501 (101)	1	801	1796	80
2349501 (101)_2349511 (103)	1	801	590	155
2349511 (103)_201515 (3)	1	801	24941	324
0201515 (3)_201521 (4)	1	801	2879	756
0201521 (4)_ Depot	1	801	52750	1837
Estac. 2835010 (110)	1	802	29833	0
2835010 (110)_2835004 (108)	1	802	3082	44
2835004 (108)_2835009 (109)	1	802	4755	83
2835009 (109)_2845021 (114)	1	802	7715	34
2845021 (114)_2845502 (115)	1	802	21268	33
2845502 (115)_2845012 (113)	1	802	5148	68
2845012 (113)_2845508 (119)	1	802	222	33
2845508 (119)_1645502 (81)	1	802	7765	456
1645502 (81)_2835502 (111)	1	802	12615	543
2835502 (111)_2835506 (112)	1	802	11403	240
2835506 (112)_2335501 (92)	1	802	13090	92
2335501 (92)_2335502 (93)	1	802	915	68
2335502 (93)_2335506 (96)	1	802	254	673
2335506 (96)_1635504 (76)	1	802	424	191
1635504 (76)_2335504 (95)	1	802	1685	265
2335504 (95)_2335503 (94)	1	802	643	121
2335503 (94)_2335002 (89)	1	802	1165	168
2335002 (89)_1658511 (84)	1	802	1578	50
1658511 (84)_1658512 (85)	1	802	961	722
1658512 (85)_ Depot	1	802	54563	683
Estac. 201525 (6)	1	803	66181	0
0201525 (6)_ Depot	1	803	44170	4650
Estac. 2849006 (121)	1	804	44987	0
2849006 (121)_2849007 (122)	1	804	737	22
2849007 (122)_2849013 (124)	1	804	3111	36
2849013 (124)_2855006 (126)	1	804	5205	47
2855006 (126)_2849011 (123)	1	804	3056	37
2849011 (123)_2349008 (99)	1	804	6923	100

Optimização de rotas na recolha de leite

2349008 (99)_2349016 (100)	1	804	5886	85
2349016 (100)_201501 (1)	1	804	32436	43
0201501 (1)_201522 (5)	1	804	9483	2528
0201522 (5)_201506 (2)	1	804	3580	435
0201506 (2)_Depot	1	804	48704	5038
Estac._2335004 (91)	1	805	55975	0
2335004 (91)_2335508 (98)	1	805	1295	129
2335508 (98)_1658506 (83)	1	805	12225	79
1658506 (83)_1658513 (86)	1	805	5733	48
1658513 (86)_1635502 (75)	1	805	542	56
1635502 (75)_1635010 (74)	1	805	3634	58
1635010 (74)_1635512 (80)	1	805	7615	150
1635512 (80)_1635509 (77)	1	805	498	94
1635509 (77)_1635511 (79)	1	805	4977	50
1635511 (79)_1601502 (73)	1	805	4273	52
1601502 (73)_1601501 (72)	1	805	2039	62
1601501 (72)_1601001 (71)	1	805	858	205
1601001 (71)_Depot	1	805	65559	80
Estac._3357517 (140)	1	806	72410	0
3357517 (140)_3357521 (142)	1	806	1723	324
3357521 (142)_3357520 (141)	1	806	25198	61
3357520 (141)_2845518 (120)	1	806	23306	78
2845518 (120)_2845504 (116)	1	806	1490	190
2845504 (116)_2845507 (118)	1	806	2033	561
2845507 (118)_2845506 (117)	1	806	1912	92
2845506 (117)_1658515 (88)	1	806	15129	328
1658515 (88)_1658003 (82)	1	806	5384	191
1658003 (82)_2858501 (135)	1	806	5491	250
2858501 (135)_2858502 (136)	1	806	1565	154
2858502 (136)_2858503 (137)	1	806	1412	204
2858503 (137)_2858001 (134)	1	806	1754	171
2858001 (134)_2358001 (107)	1	806	9579	145
2358001 (107)_1658514 (87)	1	806	8255	153
1658514 (87)_2335507 (97)	1	806	11631	719
2335507 (97)_2335003 (90)	1	806	1316	454
2335003 (90)_1635510 (78)	1	806	656	299
1635510 (78)_Depot	1	806	51147	299
Estac._448502 (10)	1	807	95978	0
0448502 (10)_448003 (9)	1	807	914	96
0448003 (9)_448508 (12)	1	807	254	106
0448508 (12)_469502 (16)	1	807	7837	268
0469502 (16)_448507 (11)	1	807	15756	98
0448507 (11)_428505 (8)	1	807	8592	220
0428505 (8)_428501 (7)	1	807	16600	173
0428501 (7)_456022 (14)	1	807	15185	164
0456022 (14)_456002 (13)	1	807	10497	50
0456002 (13)_456510 (15)	1	807	5898	67
0456510 (15)_4128502 (143)	1	807	3845	428

Optimização de rotas na recolha de leite

4128502 (143)_4152105 (144)	1	807	4978	542
4152105 (144)_4152505 (145)	1	807	6637	254
4152505 (145)_4152508 (146)	1	807	9190	192
4152508 (146)_3212505 (138)	1	807	15195	178
3212505 (138)_3212510 (139)	1	807	19608	145
3212510 (139)_Depot	1	807	115950	196
Estac._607586 (64)	1	851	3233	0
0607586 (64)_607553 (51)	1	851	4639	124
0607553 (51)_607580 (63)	1	851	5130	1060
0607580 (63)_607560 (55)	1	851	967	102
0607560 (55)_613505 (70)	1	851	17144	318
0613505 (70)_607508 (27)	1	851	19349	252
0607508 (27)_607549 (49)	1	851	291	886
0607549 (49)_607530 (36)	1	851	743	204
0607530 (36)_607048 (21)	1	851	2529	1203
0607048 (21)_Depot	1	851	20036	263
Estac._607529 (35)	1	852	5940	0
0607529 (35)_607543 (46)	1	852	3418	210
0607543 (46)_607574 (62)	1	852	25807	148
0607574 (62)_607504 (25)	1	852	3251	89
0607504 (25)_607566 (57)	1	852	22799	815
0607566 (57)_607523 (32)	1	852	6530	514
0607523 (32)_607503 (24)	1	852	1365	902
0607503 (24)_607526 (33)	1	852	6684	732
0607526 (33)_607045 (20)	1	852	6669	496
0607045 (20)_607527 (34)	1	852	707	83
0607527 (34)_Depot	1	852	20757	777
Estac._607588 (65)	1	853	7103	0
0607588 (65)_607516 (29)	1	853	6538	143
0607516 (29)_607532 (37)	1	853	396	906
0607532 (37)_607032 (19)	1	853	1074	817
0607032 (19)_607542 (45)	1	853	557	61
0607542 (45)_607534 (39)	1	853	677	420
0607534 (39)_607595 (68)	1	853	4751	1318
0607595 (68)_Depot	1	853	17314	205
Estac._607019 (17)	1	854	12236	0
0607019 (17)_607558 (54)	1	854	248	83
0607558 (54)_607568 (59)	1	854	3641	426
0607568 (59)_607519 (31)	1	854	340	95
0607519 (31)_607557 (53)	1	854	2030	184
0607557 (53)_607569 (60)	1	854	2070	96
0607569 (60)_607538 (43)	1	854	585	530
0607538 (43)_607535 (40)	1	854	216	458
0607535 (40)_607570 (61)	1	854	0	523
0607570 (61)_607563 (56)	1	854	8204	718
0607563 (56)_607544 (47)	1	854	3354	311
0607544 (47)_607591 (66)	1	854	2572	162
0607591 (66)_607101 (23)	1	854	174	273

0607101 (23)_607533 (38)	1	854	1494	53
0607533 (38)_607025 (18)	1	854	122	449
0607025 (18)_607597 (69)	1	854	164	44
0607597 (69)_607051 (22)	1	854	2634	214
0607051 (22)_607592 (67)	1	854	476	56
0607592 (67)_Depot	1	854	19144	235
Estac._607537 (42)	1	855	6167	0
0607537 (42)_607547 (48)	1	855	2962	602
0607547 (48)_607515 (28)	1	855	2206	527
0607515 (28)_607567 (58)	1	855	2000	1053
0607567 (58)_607517 (30)	1	855	1430	39
0607517 (30)_607536 (41)	1	855	6685	590
0607536 (41)_607556 (52)	1	855	186	541
0607556 (52)_607551 (50)	1	855	6937	187
0607551 (50)_607541 (44)	1	855	932	319
0607541 (44)_607506 (26)	1	855	657	309
0607506 (26)_Depot	1	855	15034	459
1 Total			1717012	53361

Anexo 5 - Tratamento de dados

Os dados relativamente a esta temática estão representados em ficheiros de Excel (xls) com os nomes das respectivas zonas:

- Zona1.xls
- Zona2.xls
- Zona3.xls
- Zona4.xls

Cada zona será otimizada individualmente.

A aplicação Java apenas suporta o formato xls (livro do Excel 97-2003), que tem uma limitação de 256 colunas. Esta limitação foi ultrapassada utilizando o ficheiro txt para armazenamento da matriz de distâncias.

Todos os ficheiros têm os dados organizados da seguinte forma:

Primeira folha: A folha “clientes”, onde estão armazenados os campos código, cliente (i), produção (qi) e Número máximo de eixos (NMaxE).

Exemplo- Zona4 (cluster inicial)

Código	Cliente (i)	Produção (qi)	Número Máximo eixos (NmaxE)
3603501	1	3100	5
3659510	2	7114	5
3659512	3	2075	5
3672520	4	6393	5
3688535	5	779	5

Segunda folha: A folha “veículos”, onde estão armazenados os campos matrícula, código, número(i) (k), capacidade (Qk), capacidade da bomba l\minuto (Cb) e número de eixos (Ne).

Exemplo - Zona 4:

Matrícula	Código	Número (k)	Capacidade (Qk)	Capacidade da bomba l\minuto (Cb)	Número de eixos (Ne)
43-58-VM	20_1	1	16600	400	3
43-54-VM	17_1	2	22200	400	4
43-57-VM	19_1	3	22200	400	4

Terceira folha: “coordenadas GPS”, que indica não só as coordenadas gps de todos os clientes mas também do estacionamento (Estac.) e depósito (Depot) a utilizar nesta zona.

Exemplo – Zona4 (cluster inicial):

Cliente	Coordenada X	Coordenada Y
Estac.	38.584937	-8.690797
3603501	38.687288	-7.55938
3659510	38.5175	-8.52086
3659512	38.53664	-8.36857
3672520	37.62412	-8.77154
3688535	38.531152	-7.92256
Depot	38.596164	-8.649647

Num ficheiro de texto está armazenada a matriz de distâncias e tempos com o seguinte formato:

Estacionamento_1 500 2

Significa que a distância entre o Estacionamento e o cliente 1 é de 500 Mt e tem uma duração de condução de 2 Min.

```

Estac._Depot 5467 9          3672520_3659510 135681 117
3603501_Estac. 136541 85    3672520_3659512 137013 122
3603501_3659510 139892 109  3672520_3688535 211658 153
3603501_3659512 117214 89    3672520_Depot 143606 111
3603501_3672520 270431 179  3688535_Estac. 81657 56
3603501_3688535 46114 52    3688535_3603501 46114 52
3603501_Depot 136495 85     3688535_3659510 73876 83
3659510_Estac. 40475 46     3688535_3659512 56790 61
3659510_3603501 139892 109  3688535_3672520 211658 153
3659510_3659512 52662 64    3688535_Depot 81294 55
3659510_3672520 135681 117  Depot_Estac. 5467 9
3659510_3688535 73876 83    Depot_3603501 136495 85
3659510_Depot 27573 43      Depot_3659510 27573 43
3659512_Estac. 69016 54     Depot_3659512 65705 54
3659512_3603501 117214 89  Depot_3672520 143606 111
3659512_3659510 52662 64   Depot_3688535 81294 55
    
```

Bibliografia

- Bianchessi, N., & Righini, G. (2007). Heuristic algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery. *Computers & Operations Research*, 34(2), 578-594.
- Battarra, M., Golden, B., and Vigo, D., (2006) Tuning a parametric Clarke-Wright heuristic via a genetic algorithm, Technical Report DEIS OR.INGCE 2006/1R.
- Bianchi, L., Birattari, M., Chiarandini, M., Manfrin, M., Mastrolilli, M., Paquete, L., ... & Schiavinotto, T. (2006). Hybrid metaheuristics for the vehicle routing problem with stochastic demands. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 5(1), 91-110.
- Bodin, L.D., Golden, B.L., Assad, A.A., and Ball, M.O., (1983). Routing and scheduling of vehicles and crews. *Computers & Operations Research*, 10(2), pp.63–211.
- Bräysy, O., & Gendreau, M. (2005). Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms. *Transportation science*, 39(1), 104-118.
- Caprara, A., Monaci, M., & Toth, P. (2003). Models and algorithms for a staff scheduling problem. *Mathematical programming*, 98(1-3), 445-476.
- Carlsson, J., Ge, D., Subramaniam, A., Wu, A., & Ye, Y. (2009). Solving min-max multi-depot vehicle routing problem. *Lectures on Global Optimization*. Fields Institute Communications, 55, 31-46.
- Chen, P., Huang, H. K., & Dong, X. Y. (2010). Iterated variable neighborhood descent algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1620-1627.
- Clarke, G. U., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4), 568-581.
- Dammeyer, F. and Voß, S., (1993) Dynamic tabu list management using the reverse elimination method, *Annals of Operations Research*, 41:31-46.
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.
- Festa, P., and Resende, M.G.C., (2009) An annotated bibliography of GRASP – Part II: Applications, *Intl. Trans. In Op. Res.*, 16:131-172.
- Hansen, P., Mladenovic, N. and Pérez, J.A.M., (2009) Variable neighbourhood search: Methods and applications, *Annals of Operations Research*, DOI 10.1007/s10479-009-0657-6.
- Ibaraki, T., Imahori, S., Nonobe, K., Sobue, K., Uno, T., & Yagiura, M. (2008). An iterated local search algorithm for the vehicle routing problem with convex time penalty functions. *Discrete Applied Mathematics*, 156(11), 2050-2069.
- Irnich, S., Funke, B., and Grünert, T., (2006) Sequential search and its application to vehicle-routing problems, *Computers & Operations Research*, 33:2405-2429,

- Karnaugh, Maurice (1976). A new class of algorithms for multipoint network optimization. *Communications, IEEE Transactions on*, 24(5), 500-505.
- Klose, A., & Drexl, A. (2005). Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research*, 162(1), 4-29.
- Lourenço, H., R Martin, H. L. O. & Stutzle, T.,. (2003). Iterated local search. *Handbook of Metaheuristics*, 57, 321-353.
- Magnanti, T. L. (1981). Combinatorial optimization and vehicle fleet planning: Perspectives and prospects. *Networks*, 11(2), 179-213.
- Martins, P. (2007). Enhanced second order algorithm applied to the capacitated minimum spanning tree problem. *Computers & operations research*, 34(8), 2495-2519.
- Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2001). *The vehicle routing problem*. Siam.
- Wolsey, L. A. (1998). *Integer programming* (Vol. 42). New York: Wiley.