



MELHORIA DOS FLUXOS LOGÍSTICOS DE UMA EMPRESA DO SETOR ALIMENTAR

RICARDO MANUEL GUIMARÃES BERTOLUCI

novembro de 2017

MELHORIA DOS FLUXOS LOGÍSTICOS DE UMA EMPRESA DO SETOR ALIMENTAR

Ricardo Manuel Guimarães Bertoluci

2º ANO

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

MELHORIA DOS FLUXOS LOGÍSTICOS DE UMA EMPRESA DO SETOR ALIMENTAR

Ricardo Manuel Guimarães Bertoluci
1120698

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação de João Augusto de Sousa Bastos.

2º ANO

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

Doutora Maria Teresa Pereira

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Mestre João Bastos

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Co-orientador

Doutor Manuel Pereira Lopes

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutora Carla Geraldes

Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Bragança

*Aos meus queridos pais,
Por tudo que sempre fizeram por mim*

*To my dear parents,
For everything they have always done for me*

*À mes chers parents,
Pour tout ce qu'ils ont fait pour moi*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Avelino e Elisabete, por serem a raiz do que melhor faço, mostro e sou. A eles devo todo o meu sucesso, pois sempre lutaram para que eu atingisse todos os meus sonhos.

A Inês Nunes, minha namorada, por todo o amor, apoio e compreensão sobretudo durante a realização deste trabalho.

À empresa Primor Charcutaria – Prima, S.A. pela oportunidade para a realização deste trabalho, em especial a Eduardo Vilas-Boas, diretor do departamento logístico da empresa, por toda a orientação, ajuda e confiança demonstrada.

Ao meu orientador, Professor João Augusto de Sousa Bastos, por toda a sua disponibilidade, atenção e ajuda na realização desta dissertação.

Ao Professor Manuel Pereira Lopes, por toda a disponibilidade demonstrada em partilhar toda a sua sabedoria comigo durante a realização deste projeto.

Ao Professor Fábio Neves Moreira, pela ajuda prestada em momentos iniciais da realização do trabalho.

A Artur Moreira, meu primo, por toda a disponibilidade para me auxiliar e esclarecer dúvidas relativamente a programação.

A toda a minha família que sempre me apoiou e incentivou em todos os momentos.

Aos meus amigos, em especial, a Luís Correia, por toda a ajuda e companhia durante todo o mestrado e, sobretudo, durante a realização deste trabalho.

PALAVRAS CHAVE

Palavras chaves: logística, distribuição, ferramenta de apoio à decisão, roteamento de veículos, *clustering*.

RESUMO

Esta dissertação descreve o trabalho desenvolvido durante o estágio curricular numa empresa do setor alimentar, com o objetivo da criação de um modelo mais eficiente de distribuição de produto acabado.

Para a obtenção do novo modelo de distribuição, foi desenvolvida uma ferramenta de apoio à decisão baseada num modelo matemático de programação inteira para o roteamento dos veículos da frota própria da empresa, enquanto que, para a frota subcontratada a mesma ferramenta baseia-se num método de duas fases. Desta forma, relativamente à frota subcontratada, a primeira etapa consiste numa repartição lógica das encomendas a efetuar, através de um método de *clustering* e, em seguida, o mesmo modelo matemático criado para o roteamento da frota própria, efetua um roteamento ótimo para cada cluster obtido.

A ferramenta de apoio à decisão provou ser capaz de atingir os objetivos propostos e sugere reduções de custo de transporte entre 18,71% e 48,20%, face ao modelo de distribuição atual da empresa. Relativamente ao custo por quilograma (€/kg), foi também obtida uma margem de poupança entre os 18,71% e 48,20%, face ao modelo atual.

Deste modo, acordo com os resultados, no pior dos cenários calculados, a ferramenta criada sugere lucros anuais até 83000 €, podendo estenderem-se até aos 377000 € de acordo com o cenário mais otimista.

Foi ainda desenvolvido um ficheiro de interface com o utilizador em *Microsoft Excel* para permitir que a ferramenta de apoio à decisão seja utilizada, sem qualquer dificuldade, por qualquer operador da empresa.

Deste modo, como resultado deste projeto, a ferramenta de apoio à decisão desenvolvida permite a criação de um novo modelo de distribuição de produto acabado mais eficiente e com a gestão do transporte centralizada na empresa.

KEYWORDS

Keywords: logistics, distribution, decision support tool, vehicle routing, clustering.

ABSTRACT

This dissertation describes all the work developed during a curricular internship, in a company that operates in the food industry, with the objective of creating a more efficient model of finished goods distribution.

To obtain the new distribution model, a decision support tool was developed based on a mathematical model of integer programming for the routing of the company's own fleet, while for the subcontracted fleet the same tool is based on a two-phased method. In this way, the first step of the method applied to the subcontracted fleet consists in a logical division of the orders to be made, through a clustering method and then, the same mathematical model created for the routing of the own fleet, is used to obtain an optimal routing for each cluster created.

The decision support tool proved to be able to reach the initial proposed objectives and suggests reductions of the transportation cost between 18.71% and 48.20%, given the current distribution model of the company. About the cost per kilogram (€/kg), a saving margin of 18.71% and 48.20% was also obtained, compared to the company's current model of distribution.

According to the results, in the worst-case scenario, the tool created suggests annual profits up to € 83000 and can be extended up to € 377000 according to the most optimistic scenario.

A user interface file was also developed in Microsoft Excel to allow the decision support tool to be used, without any difficulty, by any operator of the company.

The developed decision support tool allows the creation of a new model of finished goods distribution much more efficient and with the management of the distribution centralized in the company.

LISTA DE ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

<i>CVRP</i>	<i>Capacitated Vehicle Routing Problem</i>
<i>DCVRP</i>	<i>Distance-Constrained and Capacitated VRP</i>
DPEST	Dissertação/Projeto/Estágio,
<i>GAP</i>	<i>Generalized Assignment Problem</i>
<i>MDVRP</i>	<i>Multidepot Vehicle Routing Problem</i>
<i>MFVRP</i>	<i>Mix Fleet Vehicle Routing Problem</i>
<i>NP</i>	<i>Non-Deterministic Polynomial Time</i>
<i>OVRP</i>	<i>Open Vehicle Routing Problem</i>
PLT	Paletes
PVC	Problema do Caixeiro Viajante
<i>PVRP</i>	<i>Periodic Vehicle Routing Problem</i>
SAC	Serviço de Apoio ao Cliente
<i>SDVRP</i>	<i>Split Delivery Vehicle Routing Problem</i>
TD	Transporte Direto
<i>TSP</i>	<i>Travelling Salesman Problem</i>
<i>TSPTW</i>	<i>Travelling Salesman Problem with Time Windows</i>
TVE	Transporte Via Entrepasto
<i>VRP</i>	<i>Vehicle Routing Problem</i>
<i>VRPB</i>	<i>Vehicle Routing Problem with Backhauls</i>
<i>VRPPD</i>	<i>Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery</i>
<i>VRPTW</i>	<i>Vehicle Routing Problem with Time Windows</i>

GLOSSÁRIO DE TERMOS

<i>Clustering</i>	Técnica que a partir de um conjunto de entidades heterogéneas, cria aglomerados de entidades homogéneas, designados por <i>clusters</i> .
<i>Kaizen</i>	De acordo com o <i>Kaizen Institute</i> , significa a prática de Melhoria contínua, derivando de <i>Kai-Mudar</i> , <i>Zen-Melhor</i> .
Roteamento	Definição de um conjunto de rotas.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - DEMONSTRAÇÃO DE UM GRAFO COMPLETO À ESQUERDA E, À DIREITA, UM GRAFO INCOMPLETO	36
FIGURA 2 - GRAFO DE UM VRP ASSIMÉTRICO À ESQUERDA E, À DIREITA, GRAFO DE VRP SIMÉTRICO	36
FIGURA 3 - EXEMPLO DE SOLUÇÃO DE UM TRAVELLING SALESMAN PROBLEM	37
FIGURA 4 - EXEMPLO DE UM PROBLEMA VRP CONSTITUÍDO POR TRÊS PROBLEMAS TSP.....	37
FIGURA 5 - DIFERENTES MÉTODOS DE CLUSTERING PARA UM CONJUNTO DE ENTIDADES (ADAPTADA DE STEINBACH ET AL. (2004)).....	44
FIGURA 6 - TAXONOMIA DOS MÉTODOS DE CLUSTERING (ADAPTADA PARA PORTUGUÊS DE JAIN ET AL. (1999)).....	45
FIGURA 7 - EXEMPLO DE UM CLUSTERING HIERÁRQUICO DE LIGAÇÃO ÚNICA (ADAPTADA DE JAIN ET AL. (1999)).....	46
FIGURA 8 - À ESQUERDA, MÉTODO HIERÁRQUICO DIVISIVO E, À DIREITA, MÉTODO HIERÁRQUICO AGLOMERATIVO.....	46
FIGURA 9 - ESQUEMA DO MÉTODO DE DONDO AND CERDÁ (2007).....	51
FIGURA 10 - GRÁFICO DE COMPARAÇÃO ENTRE OS CUSTOS POR QUILOGRAMA DOS SERVIÇOS SUBCONTRATADOS.....	65
FIGURA 11 - EXEMPLO DE CLUSTERING CASO FOSSE ESCOLHIDO O RÁCIO MAIS BAIXO APENAS	69
FIGURA 12 - EXEMPLO DE CLUSTERING CASO FOSSEM ESCOLHIDAS TODAS AS CIDADES ALVO.....	69
FIGURA 13 - REPARTIÇÃO DO CONJUNTO DE ENTIDADES DE ACORDO COM AS DUAS POSSIBILIDADES..	70
FIGURA 14 - FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE CLUSTERING USADO	71
FIGURA 15 - DEPÓSITO FINAL FICTÍCIO PARA A FROTA SUBCONTRATADA.....	73
FIGURA 16 - TRANSFORMAÇÃO DOS CONCELHOS DA FORMA IRREGULAR PARA QUADRADA.....	84
FIGURA 17 - FOLHA DE INTERAÇÃO ENTRE FERRAMENTA E OPERADOR.....	105
FIGURA 18 - SITUAÇÃO NORMAL DE PREENCHIMENTO DOS DADOS ATRAVÉS DA MACRO	106
FIGURA 19 - ERRO RELACIONADO COM O NÚMERO DE IDENTIFICAÇÃO DO CLIENTE	106
FIGURA 20 - ERRO RELACIONADO COM A QUANTIDADE DE PALETES A ENTREGAR	107
FIGURA 21 - ERRO DA QUANTIDADE DE QUILOGRAMAS DE UMA ENCOMENDA INTRODUZIDA	108
FIGURA 22 - EXEMPLO DE TRAJETOS POSSÍVEIS, DISTÂNCIAS, CUSTOS E PROCURAS ASSOCIADAS.....	108
FIGURA 23 – FUNÇÃO OBJETIVO DO MODELO APRESENTADA À ESQUERDA, TABELA DE SOMATÓRIO DE CARGAS E DISTÂNCIAS AO CENTRO, E TABELA DE VARIÁVEIS DE DECISÃO COM CÁLCULO PARA A RESTRIÇÃO MTZ, APRESENTADA À DIREITA.....	109
FIGURA 24 - TABELAS DE SOMATÓRIOS DE CHEGADAS E PARTIDAS DOS NÓS, CONSIDERANDO CADA UM DOS VEÍCULOS, À ESQUERDA, E, À DIREITA, O SOMATÓRIO TOTAL.....	109
FIGURA 25 - PARTE 1 DAS RESTRIÇÕES DO MODELO MATEMÁTICO CRIADO	110
FIGURA 26 - PARTE 2 DAS RESTRIÇÕES DO MODELO MATEMÁTICO	110
FIGURA 27 - MENSAGEM DE AVISO AO OPERADOR COM O CUSTO E A ROTA DEFINIDA.....	111
FIGURA 28 - PROTEÇÃO CONTRA A SELEÇÃO INVOLUNTÁRIA DO BOTÃO DE CÁLCULO	111
FIGURA 29 - EXEMPLO DE CLUSTERS FORMADOS PARA A LISTA DE ENCOMENDAS A EFETUAR COM FROTA SUBCONTRATADA	112

FIGURA 30 – DUAS MENSAGENS DE INTERAÇÃO COM O OPERADOR APÓS ROTEAMENTO DE FROTA SUBCONTRATADA.....	114
FIGURA 31 - BOTÃO QUE ATIVA A MACRO "VOLTAR" NA BASE DE DADOS DE VEÍCULOS.....	115

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DE DIFERENTES VARIANTES VRP (DESCRIÇÕES BASEADAS EM FARAHANI ET AL. (2011)).....	38
TABELA 2 - ALGUMAS DISTINÇÕES DE MÉTODOS DE CLUSTERING (BASEADO EM JAIN ET AL. (1999); STEINBACH ET AL. (2004)).....	47
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DA FROTA PRÓPRIA DA EMPRESA.....	56
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DE VEÍCULOS DE FROTA SUBCONTRATADA	57
TABELA 5 - CUSTO POR QUILOMETRO E POR QUILOGRAMA CALCULADOS PARA CADA GÊNERO DE VEÍCULO DA FROTA PRÓPRIA	64
TABELA 6 - ETAPAS PRESENTES NO MÉTODO DE CLUSTERING DESENVOLVIDO	67
TABELA 7 - PARÂMETROS UTILIZADOS E NECESSÁRIOS AO MODELO MATEMÁTICO.....	73
TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS DA FROTA PRÓPRIA PARA O ROTEAMENTO	81
TABELA 9 - LIMITAÇÕES DA FROTA SUBCONTRATADA PARA O MODELO MATEMÁTICO.....	82
TABELA 10 - TABELA DE VALORES DE REFERÊNCIA PARA A FROTA SUBCONTRATADA.....	82
TABELA 11 – DISTÂNCIAS, EM QUILOMETROS, ENTRE OS CLIENTES SORTEADOS UTILIZANDO MÉTODO CRIADO.....	85
TABELA 12 - DISTÂNCIAS REAIS, EM QUILOMETROS, ENTRE OS CLIENTES SORTEADOS	85
TABELA 13 – ERRO DO MÉTODO CRIADO RELATIVAMENTE À DISTÂNCIA REAL.....	85
TABELA 14 - VALORES PRATICADOS PARA A FROTA PRÓPRIA ATRAVÉS DO MODELO ATUAL	87
TABELA 15 - VALORES CALCULADOS PARA A FROTA PRÓPRIA ATRAVÉS DA FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO	87
TABELA 16 - COMPARAÇÃO ENTRE AS SOLUÇÕES OBTIDAS UTILIZANDO A FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO E O MÉTODO ATUAL	88
TABELA 17 - VALORES PRATICADOS PARA A FROTA SUBCONTRATADA DE ACORDO COM O MODELO ATUAL	89
TABELA 18 - VALORES OBTIDOS PARA A FROTA SUBCONTRATADA ATRAVÉS DA FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO.....	90
TABELA 19 - VALORES OBTIDOS PARA A FROTA SUBCONTRATADA OPTANDO PELO SERVIÇO MAIS BARATO PARA CADA VEÍCULO	90
TABELA 20 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS, DA FROTA SUBCONTRATADA, ENTRE O MÉTODO ATUAL E A FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO PARA O ROTEAMENTO CRIADA.....	91
TABELA 21 - VALORES GLOBAIS PARA O TRANSPORTE DE ACORDO COM O MÉTODO ATUAL DA EMPRESA	92
TABELA 22 - VALORES GLOBAIS PARA O TRANSPORTE DE ACORDO CALCULADOS PELA FERRAMENTA CRIADA.....	92
TABELA 23 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS GLOBAIS ENTRE O MÉTODO ATUAL DE DISTRIBUIÇÃO E A FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO CRIADA	92
TABELA 24 - RESULTADOS DOS PROBLEMAS DE TESTE PARA A FROTA SUBCONTRATADA ATRAVÉS DA FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO.....	116

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	27
1.2	OBJETIVOS	27
1.3	METODOLOGIA	28
1.4	ESTRUTURA DO RELATÓRIO	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1	VRP – VEHICLE ROUTING PROBLEM	33
2.1.1	MÉTODOS EXATOS DE CÁLCULO	40
2.2	CLUSTERING	44
2.2.1	MÉTODO K-MEANS OU K-MÉDIAS	48
2.2.2	MÉTODO DE GILLET & MILLER	49
2.2.3	MÉTODO DE FISHER & JAIKUMAR	50
2.2.4	MÉTODO DE DONDO & CERDÁ	50
2.2.5	MÉTODO DE BEASLEY	52
3	DESCRIÇÃO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	55
3.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA REAL	55
3.1.1	FROTAS DISPONÍVEIS	55
3.1.2	MODELO DE DISTRIBUIÇÃO ATUAL	57
3.1.3	MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DESEJADO	59
3.2	CRIAÇÃO DE UMA FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO	61
3.2.1	CUSTOS DO SERVIÇO DE TRANSPORTE	63
3.3	CLUSTERING PARA A FROTA SUBCONTRATADA	65
3.4	ABORDAGENS AOS PROBLEMAS E MODELO MATEMÁTICO	71
4	IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS	79
4.1	BASE DE DADOS DE CLIENTES	80
4.2	BASE DE DADOS DE VEÍCULOS	80
4.3	BASE DE DADOS DE DISTÂNCIAS	83

4.4	RESULTADOS OBTIDOS	86
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	97
5.1	CONCLUSÕES	97
5.2	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	98
	BIBLIOGRAFIA	101
	ANEXO A	105
	ANEXO B	116

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.2 OBJETIVOS

1.3 METODOLOGIA

1.4 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

1 INTRODUÇÃO

A dissertação apresentada surge como prova necessária para aprovação à disciplina *DPEST – Dissertação/Projeto/Estágio*, que permitirá a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na especialidade de Gestão Industrial, pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Todo o trabalho descrito neste documento, foi desenvolvido em ambiente empresarial, numa empresa que atua no setor alimentar sediada em Vila Nova de Famalicão, através da realização de um estágio curricular, possibilitado pela parceria entre a empresa e a instituição de ensino.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Em períodos anteriores à proposta de estágio curricular na empresa, não existia um departamento de gestão logística, estando a gestão destes processos ao encargo do responsável pelo *SAC – Serviço de Apoio ao Cliente* da empresa. Esta situação levou a que os processos logísticos, sobretudo os relacionados com a gestão de transporte de produto acabado, tivessem menor atenção relativamente a outros processos.

Numa tentativa de reverter a situação, sobretudo pela influência da filosofia *Kaizen* que a empresa estava a implementar principalmente a nível de produção, surge a criação de um departamento de gestão logística, com o objetivo de eliminar todos desperdícios e redundâncias identificados nos vários processos logísticos.

Com a criação de um departamento logístico, surge como uma das prioridades a necessidade de se redefinir o modelo logístico de distribuição de produto acabado da empresa. Uma vez que não existia conhecimento académico para resolver este tipo de problemas por parte dos operadores da empresa, surge a oportunidade da realização de um estágio curricular para o desenvolvimento e aplicação de um modelo de distribuição mais eficiente.

1.2 OBJETIVOS

Com a realização deste estágio a empresa pretende o desenvolvimento e a implementação de um novo modelo de distribuição de produto acabado mais eficiente relativamente ao modelo atual, procurando como objetivo prioritário uma redução de custos de transporte e sempre respeitando os critérios de gestão estratégica definidos pela direção.

Deste modo, o novo modelo de distribuição deverá ser capaz de dividir de uma forma mais eficiente que a efetuada atualmente, as encomendas entre a frota própria da empresa e a frota subcontratada, maximizando a utilização dos veículos próprios de acordo com as restrições impostas para este tipo de frota.

Além deste objetivo, uma vez que não existe este serviço atualmente, o departamento logístico tem como intenção a criação de transporte direto ao cliente com recurso a frota subcontratada criando uma alternativa ao transporte via entreposto, o único que tem vindo a ser praticado.

Deverá ainda ser criada uma ferramenta de apoio à decisão como suporte do modelo desenvolvido, que seja interativa e permita uma fácil compreensão dos resultados obtidos ao responsável de transporte, para este decidir o melhor cenário para cada dia de trabalho a efetuar na distribuição.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia seguida para a realização deste trabalho divide-se em cinco etapas principais.

A primeira das etapas, e a única que se estende no decorrer de todo o trabalho, está relacionada com uma revisão bibliográfica para um enquadramento teórico relativamente a processos logísticos, sobretudo relacionados com o roteamento de veículos, mas também relativamente a diferentes métodos de *clustering*.

Em seguida, foi necessário estudar detalhadamente o modelo de distribuição atual realizado pela empresa, analisando cada uma das suas lacunas.

Já na terceira fase, foi desenhado um novo modelo de distribuição que deverá ser obtido com a criação de uma ferramenta de apoio à decisão para o roteamento, capaz de suportar o modelo de negócio da empresa.

A quarta etapa diz respeito à criação de uma aplicação para a ferramenta de apoio à decisão desenvolvida que permitirá a qualquer operador efetuar um roteamento de um conjunto de entregas.

A última etapa diz respeito à implementação e avaliação de resultados da ferramenta de apoio à decisão desenvolvida que permite a criação de um novo modelo de distribuição da empresa.

1.4 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

O presente relatório estará dividido em cinco capítulos principais, sendo eles, Introdução, Revisão Bibliográfica, Descrição e Formulação do Problema, Implementação e Resultados Obtidos e, por fim, Conclusões.

No primeiro capítulo será feita uma breve introdução ao trabalho desenvolvido, efetuando uma contextualização da realização deste trabalho, enumerando os principais objetivos com a realização do estágio curricular, apresentando a metodologia utilizada durante o decorrer do estágio na empresa e, por fim, uma explicação da estrutura do relatório.

No segundo capítulo, referente à Revisão Bibliográfica, é feita uma descrição teórica sobre os dois temas principais que sustentam o trabalho efetuado. O primeiro dos temas abordado é *Vehicle Routing Problem*, enquanto que, o segundo é dedicado a métodos de repartição, isto é, *Clustering*.

O terceiro capítulo, descreve o problema encontrado na empresa, bem como, todo o trabalho efetuado durante o estágio curricular. Este capítulo está dividido em quatro subcapítulos, compostos pela descrição do problema, a justificação da criação de uma ferramenta de apoio à decisão, uma descrição do método de *clustering* desenvolvido, demonstradas as abordagens a cada um dos problemas e o modelo matemático de programação inteira linear.

No capítulo quatro, é apresentada a implementação da ferramenta criada, onde estão presentes as bases de dados utilizadas que permitem a obtenção dos resultados para 10 dias de teste de atividade da empresa.

O quinto e último capítulo apresenta as conclusões principais ao trabalho desenvolvido, bem como, as sugestões para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VRP – VEHICLE ROUTING PROBLEM

2.1.1 MÉTODOS EXATOS DE CÁLCULO

2.2 CLUSTERING

2.2.1 MÉTODO K-MEANS OU K-MÉDIAS

2.2.2 MÉTODO DE GILLETT & MILLER

2.2.3 MÉTODO DE FISHER & JAIKUMAR

2.2.4 MÉTODO DE DONDO & CERDÁ

2.2.5 MÉTODO DE BEASLEY

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é efetuada uma revisão bibliográfica com o objetivo de permitir um enquadramento dos conhecimentos necessários para o presente trabalho.

Deste modo, num primeiro subcapítulo é feita uma revisão sobre problemas de roteamento de veículos, mais conhecidos por *VRP – Vehicle Routing Problem*, uma vez que o objetivo será a criação de uma ferramenta de apoio à decisão para o roteamento de veículos.

É também dedicado um segundo subcapítulo a uma revisão bibliográfica sobre *Clustering*, isto é, métodos de repartição de um problema, visto ter sido uma técnica usada na resolução do problema em estudo.

2.1 VRP – VEHICLE ROUTING PROBLEM

Um dos processos chave de qualquer modelo de distribuição de uma empresa será sempre o roteamento e escalonamento de veículos a um conjunto de clientes (Solomon, 1987).

Sendo este um dos maiores problemas encontrados em empresas de logística e transporte, poderá ser escrito sob a forma de um problema de roteamento de veículos, isto é, um *VRP – Vehicle Routing Problem* (Lau, Sim, & Teo, 2003).

Desta forma, um *VRP* é usado para calcular rotas ótimas, sendo estas as que têm menor custo, tempo ou distância, de um conjunto de veículos, fixo ou não, para abastecer um conjunto de clientes que possuem uma procura conhecida e não negativa, respeitando sempre um conjunto de restrições definidas (Kumar & Panneerselvam, 2012).

De acordo com Laporte, Gendreau, Potvin, and Semet (2000), as restrições definidas num problema *VRP* deverão garantir que cada rota começa e termina no depósito definido, cada cliente é visitado exatamente uma vez e abastecido por apenas um veículo e, por fim, o somatório da procura do conjunto de clientes incluídos numa rota não deverá ser superior à capacidade do veículo. Além destas, é comum serem adicionadas restrições de distância e/ou tempo total para se cumprir uma rota.

Um problema *VRP* pode ser formulado matematicamente da seguinte forma:

$$\text{minimizar Custo de Transporte} = \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} * x_{ij}^k \quad (2.1)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{k \in V} \sum_{j \in N} x_{ij}^k = 1, \forall i \in C \quad (2.2)$$

$$\sum_{i \in C} d_i * \sum_{j \in N} x_{ij}^k \leq q^k, \forall k \in V \quad (2.3)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0j}^k = 1, \forall k \in V \quad (2.4)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ih}^k - \sum_{j \in N} x_{hj}^k = 0, \forall h \in C, \forall k \in V \quad (2.5)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,n+1}^k = 1, \forall k \in V \quad (2.6)$$

$$(s_i^k + t_{ij}) - M(1 - x_{ij}^k) \leq s_j^k, \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (2.7)$$

$$a_i \leq s_i^k \leq b_i, \forall i \in N, \forall k \in V \quad (2.8)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (2.9)$$

O modelo apresentado, retirado de El-Sherbeny (2010), é uma formulação matemática de um problema de roteamento de veículos homogêneos e apenas um depósito para abastecer um conjunto de clientes, com janela de entrega definida, apenas com uma única visita e com recurso a um único veículo.

Neste modelo matemático de três índices, sendo que dois índices, geralmente representados por i e j , embora na restrição (2.5) seja necessário o uso de um índice h , são relativos ao início e fim de um arco e o índice k representa o veículo utilizado, estão presentes três conjuntos de entidades. O conjunto V que se refere ao conjunto de veículos disponíveis, o conjunto C que representa todos os clientes a serem abastecidos e, por fim, o conjunto N que representa todos os vértices do problema, onde estão presentes todos os clientes e, os dois vértices referentes ao depósito, o depósito de saída representado por 0 e o depósito de retorno como $n+1$. São ainda utilizados os seguintes parâmetros necessários à formulação do problema: d_i – procura do cliente i , q^k – capacidade de carga do veículo k , M – constante elevada que garante a veracidade da restrição, s_i – horário de referência do início do serviço de entrega ao cliente i , t_{ij} – tempo necessário para percorrer o arco de origem no cliente i até ao cliente j , a_i e b_i – representam os horários, de abertura e fecho respetivamente, da janela de entrega do cliente i .

Relativamente à janela de entrega, para o serviço ser efetuado um determinado veículo deverá chegar ao cliente i sempre antes do fecho da janela de entrega, b_i , mas poderá chegar antes do horário da abertura da mesma, a_i , no entanto, o cliente só será abastecido depois da abertura da janela. Os depósitos também têm as suas próprias janelas de entrega, sendo que relativamente ao depósito inicial, a_0 e s_0^k serão sempre iguais a zero, pois assinalam o início de uma rota e, relativamente ao depósito final, os veículos deverão regressar sempre antes do fecho da janela, isto é s_{n+1}^k tem que ser inferior ao valor de b_{n+1} , de forma a respeitar as restrições de tempo de serviço de um determinado veículo k .

Relativamente às variáveis de decisão, o problema necessita de duas, sendo x_{ij}^k uma variável binária, para todo o $i \neq j$, de valor 1 quando indica a existência de fluxo no arco de origem no cliente i e com destino no cliente j recorrendo ao veículo k e, valor 0 caso não exista fluxo. Por fim, s_i^k uma variável de decisão maior ou igual a zero que indica o horário que o cliente i irá ser abastecido pelo veículo k .

Assim, a equação (2.1) representa a função objetivo do problema que pretende minimizar o custo de transporte para abastecer o conjunto de clientes, estando, no entanto, sujeita a um conjunto de restrições. A equação (2.2) pretende garantir que todos os clientes serão abastecidos uma única vez e recorrendo a apenas um veículo, enquanto que, a equação (2.3) garante que um veículo não seja sobrecarregado, isto é, a soma da procura dos clientes a abastecer não ultrapasse a sua capacidade de carga. A restrição (2.4) garante que cada veículo terá que sair do depósito inicial, enquanto que a equação (2.5) é a restrição de conservação de fluxo que assegura que quando um veículo chega a determinado cliente h , deverá ter que sair em direção a outro cliente e, a restrição (2.6) garante que todo o veículo k deverá regressar ao depósito final. A equação (2.7) é uma restrição *MTZ* usada para calcular o horário de serviço a um cliente recorrendo ao veículo k para criar um encadeamento na rota e, desta forma, irá evitar a criação de subpercursos, enquanto que a restrição 2.8 assegura que o horário de serviço calculado na equação (2.7) estará dentro dos limites impostos pela janela de entrega. Por fim, a restrição (2.9) assegura que a variável de decisão x_{ij}^k é binária, tomando apenas valores de zero ou um.

Para Eksioglu, Vural, and Reisman (2009), o problema *VRP* é formalmente representado como um grafo e, desta forma, $G = (V, A)$ é um grafo completo, no qual $V = \{0, 1, 2, 3, \dots, n\}$ é o conjunto de vértices, enquanto que, A corresponde ao conjunto de todos os arcos. No que diz respeito ao conjunto V , os vértices $j = (1, 2, 3, \dots, n)$ correspondem aos clientes, aos quais deverá sempre estar associada uma procura não negativa p_j que deverá ser satisfeita, enquanto que, o vértice $j = 0$ corresponde ao depósito. Em alguns modelos o depósito é representado por dois vértices, $j = 0$ que assinala o depósito no início de uma rota e o vértice $j = n+1$ que representa o depósito no final da mesma. Esta divisão acontece devido à necessidade de um encadeamento para possibilitar o uso de restrições adicionais, como a restrição *MTZ* para a eliminação de subpercursos, mas também para problemas em que o roteamento não termine no depósito inicial. Além da procura dos clientes, está sempre associada uma distância d_{ij} , tempo t_{ij} , ou custo c_{ij} ao arco $(i, j) \in A$, que representa a distância, tempo ou custo ao percorrer o arco com origem no vértice i e destino no vértice j .

Numa situação em que todos os vértices de um grafo de um problema *VRP*, possuem arcos de ligação diretos com todos os vértices restantes do mesmo grafo, designa-se que o problema *VRP* possui um grafo completo. Se faltar, pelo menos um arco de ligação entre os vértices, o grafo do problema designa-se como incompleto (Hoffman, Padberg, & Rinaldi, 2013).

A Figura 1 possui uma demonstração de dois grafos, em que à esquerda é apresentado um grafo completo e, à direita, um grafo incompleto.

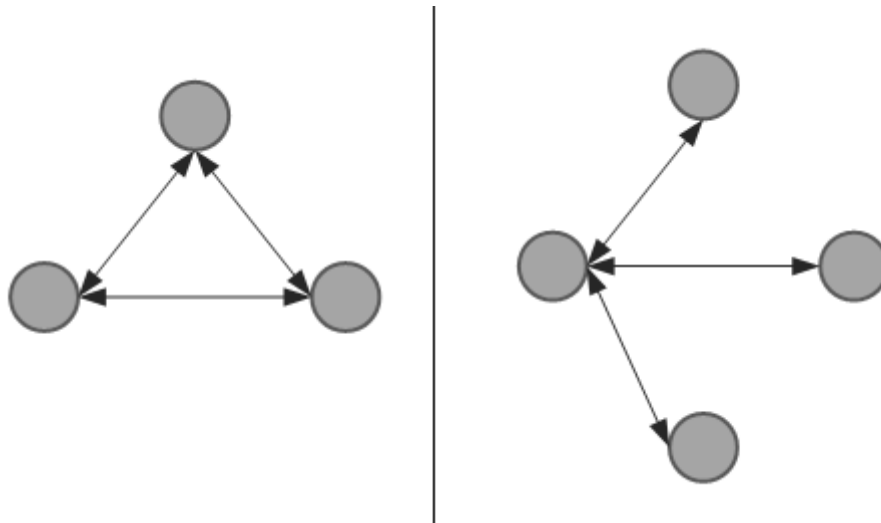


Figura 1 - Demonstração de um grafo completo à esquerda e, à direita, um grafo incompleto

No caso de os valores de distância, custo ou tempo, qualquer um dos três parâmetros representado por z , satisfazerem a condição $z_{ij} = z_{ji}$ para todos os valores de $(i, j) \in V$, então o problema será considerado um *VRP* simétrico, no caso contrário, será designado por *VRP* assimétrico. A Figura 2 apresenta dois exemplos simples grafos de um *VRP*, sendo que, o grafo da esquerda é um grafo de um *VRP* assimétrico, enquanto que à direita, o grafo representa um *VRP* simétrico (Eksioglu et al., 2009).



Figura 2 - Grafo de um *VRP* assimétrico à esquerda e, à direita, grafo de *VRP* simétrico

Uma forma adicional de caracterizar um problema *VRP*, é designando-o como um múltiplo problema *TSP* – *Travelling Salesman Problem*, em português *PVC* – *Problema do Caixeiro Viajante*.

Deste modo, considerando um grafo composto por um conjunto de locais a visitar e, com um conjunto de arcos entre todos os locais com distâncias, tempos ou custos associados, um problema *TSP* tem como objetivo minimizar a distância, tempo de serviço ou custo de uma rota para um veículo saindo do depósito, visite todos os locais previamente definidos uma única vez, e, por fim, regresse ao ponto inicial. Assim, a solução obtida pela resolução do problema é simplesmente a ordem pela qual se deverão visitar os locais antes de o veículo regressar ao ponto de partida (Applegate, Bixby, Chvatal, & Cook, 2011).

A Figura 3, demonstra um exemplo de solução de um problema *TSP*.

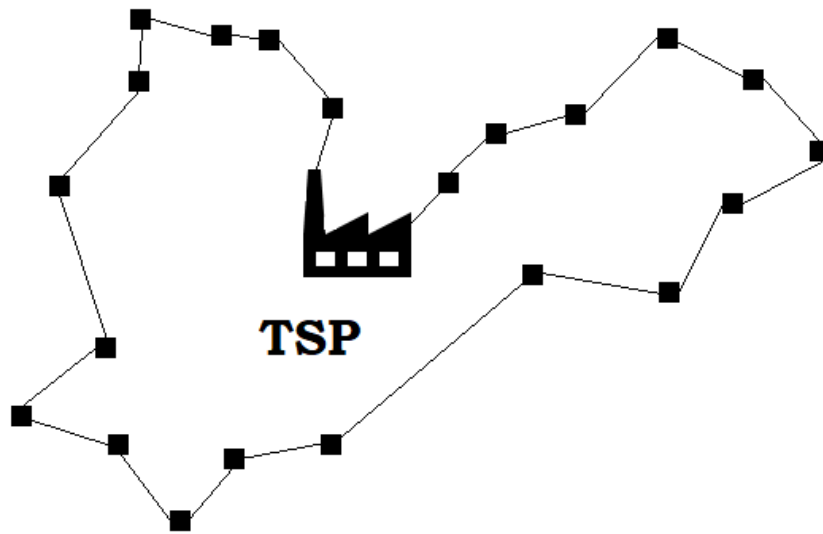


Figura 3 - Exemplo de solução de um Travelling Salesman Problem

Resumidamente, pode-se considerar um problema *TSP* como a criação de apenas uma rota para um só veículo para visitar um conjunto de clientes selecionados, enquanto que, um problema *VRP* deverá criar k rotas para k veículos existentes, de forma a que estes abasteçam o conjunto de clientes. Deste modo, cada rota e/ou veículo presente num problema *VRP* poderá ser considerado como um problema *TSP* e, conseqüentemente, quantas mais rotas e/ou veículos o problema *VRP* possuir, mais problemas *TSP* estarão presentes. A Figura 4, demonstra um exemplo de um problema *VRP*, com três rotas destinadas a três veículos, composto a partir de três problemas *TSP*.

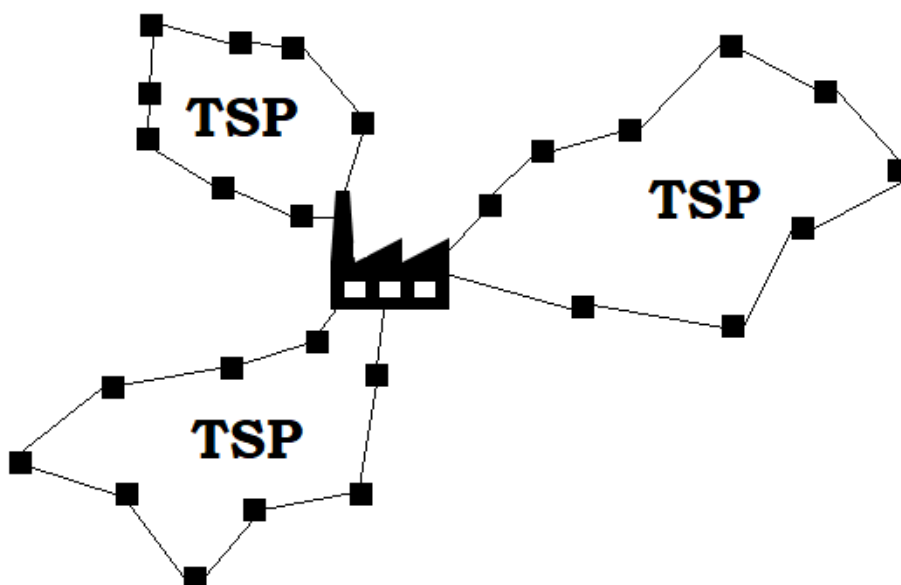


Figura 4 - Exemplo de um problema VRP constituído por três problemas TSP

Sendo um dos problemas da atualidade, bastante estudado pela comunidade científica, o problema *VRP* apresenta diversas variantes aplicadas a diferentes casos, bem como, diferentes métodos de solucionar este problema. Relativamente às variantes *VRP*, serão apenas descritas aquelas que para Farahani, Rezapour, and Kardar (2011) são as variantes mais básicas, mas também as mais utilizadas. Assim, a Tabela 1, apresenta diferentes designações, siglas provenientes das designações em inglês, e a descrição de algumas variantes do problema *VRP*.

Tabela 1 - Caracterização de diferentes variantes *VRP* (descrições baseadas em Farahani et al. (2011))

Sigla	Designação	Descrição
CVRP	VRP capacitado	É a versão mais básica de um problema <i>VRP</i> . Nesta variante, cada veículo terá uma capacidade limitada e, desta forma, não é possível o veículo transportar uma carga superior à sua capacidade. Além das restrições de capacidade serem obrigatórias, a procura dos clientes não pode ser dividida por diferentes veículos.
DCVRP	VRP capacitado e limitado em distância	É uma variante mais completa do <i>CVRP</i> , na qual o problema está limitado com restrições de capacidade, bem como, uma distância máxima. Assim, uma rota não deverá exceder a capacidade de carga de um veículo, nem o seu comprimento total definido.
VRPTW	VRP com janela temporal	É uma extensão da variante do <i>CVRP</i> , na qual o serviço de entrega a um cliente deverá começar dentro de uma janela de entrega específica e, o veículo deverá permanecer no cliente até o serviço estar completo.
VRPB	VRP com recolha de mercadoria	É uma extensão do <i>CVRP</i> , onde os clientes podem ser abastecidos ou retornar produtos. Deste modo, está dividida em dois conjuntos: o conjunto de clientes que desejam ser abastecidos e, o conjunto de clientes nos quais deve ser recolhida mercadoria. A ideia é minimizar o custo de transporte, reduzindo trajetos a efetuar por ser possível recolher mercadoria enquanto é feita a distribuição. É necessário assumir que as entregas são efetuadas antes de qualquer recolha.
VRPPD	VRP de recolha e entrega	Esta variante é semelhante ao <i>VRPB</i> , no entanto os veículos terão duas tarefas: entregar mercadoria ao cliente, assim como recolher a mercadoria do cliente que for necessária. Assim, um conjunto heterogêneo de veículos deverá ser capaz de satisfazer os pedidos de transporte de entrega e recolha de produtos.

OVRP	VRP aberto		É uma variante de VRP na qual os veículos não têm obrigação de voltar ao depósito inicial. É normalmente utilizada por empresas que não possuem frota própria ou, a frota disponível não é suficiente para a realização do percurso e surge a necessidade de serem subcontratados veículos. Neste problema, os veículos subcontratados são atribuídos a rotas nas quais o veículo não tem necessidade de voltar ao depósito da empresa.
MDVRP	VRP múltiplos depósitos	com	Num problema VRP clássico, existe apenas um só depósito e todos os veículos deverão iniciar e terminar as rotas nesse local. Num problema VRP com múltiplos depósitos, cada cliente é visitado por apenas um veículo que tenha origem em um dos depósitos existentes. Esta variante pode também ser vista como um problema de <i>Clustering</i> , uma vez que um conjunto de veículos é agrupado por depósito.
MFVRP	VRP de frota mista		É uma distinção do problema de VRP clássico por usar veículos heterogêneos. Neste tipo de problema, existe uma frota de veículos que possuem diferentes capacidades de carga, assim como, diferentes custos fixos e variáveis. Nesta variante, o custo total de transporte é caracterizado por ser a soma de todos os custos fixos e variáveis, sendo eles dependentes da distância a percorrer pela frota.
SDVRP	VRP com entrega dividida		É uma variante que provém da relaxação de um VRP clássico que permite a divisão da mercadoria a ser entregue por diferentes veículos, no caso de esta divisão reduzir os custos totais de transporte.
PVRP	VRP periódico		Variante de um problema VRP que garante a distribuição a um conjunto de clientes que, em um determinado horizonte temporal, deverão ser abastecidos as vezes definidas.

Além das enunciadas na Tabela 1, podem ainda ser encontradas outras versões deste problema de roteamento, embora o cenário mais comum nas empresas seja uma variante *VRP* personalizada, através da junção de várias versões do problema descritas na Tabela 1. Esta nova variante, faz com que os resultados para o roteamento sejam bem mais precisos e, conseqüentemente, os mais indicados para resolver o problema verificado no modelo de distribuição.

No entanto, devido aos problemas de roteamento pertencerem ao grupo de problemas NP^1 difíceis ou NP completos, continua a ser muito difícil chegar à solução ideal, mesmo por vezes para problemas de pequenas dimensões em que são usados poucos veículos e existem poucos clientes e/ou cidades a visitar.

Deste modo, para a obtenção de soluções para este problema, existem vários métodos de cálculo, entre eles os métodos exatos que fornecem a solução ótima do problema, mas também métodos heurísticos que, apesar de nem sempre garantirem o resultado ótimo, fornecem soluções admissíveis e, tipicamente, apresentam bons resultados. No seguimento deste capítulo, serão apresentados apenas alguns métodos exatos de cálculo.

2.1.1 MÉTODOS EXATOS DE CÁLCULO

Os métodos exatos de cálculo fornecem a solução ideal para o problema, no entanto, os algoritmos exatos conseguem apenas resolver problemas de dimensões relativamente pequenas, embora alguns algoritmos terem já provado fornecer resultados bastante satisfatórios (Laporte, 1992).

Relativamente aos métodos exatos, Laporte and Nobert (1987) destacam que estes estão divididos em três categorias principais, sendo elas: Procura Direta na árvore de pesquisa, Programação Dinâmica e, por fim, Programação Inteira - PI.

2.1.1.1 PROCURA DIRETA NA ÁRVORE DE PESQUISA

Considerando um problema VRP como o roteamento de um conjunto de veículos, a partir de um único depósito, com o objetivo de minimizar a distância total percorrida para abastecer um conjunto de clientes com procura definida, Christofides, Mingozzi, and Toth (1981) desenvolveram dois métodos de solução exata para a resolução destes problemas, que funcionam pela procura direta numa árvore de pesquisa *Branch & Bound* com incorporação de limites inferiores, *lower bounds*.

Num dos métodos desenvolvidos pelos autores, designado por *Branching on an arc*, um determinado arco é escolhido para ramificação para um determinado nó da árvore de pesquisa para o acrescentar a uma rota parcialmente completa. Existe ainda a opção de rejeitar a inclusão do nó como uma extensão possível para a rota. Relativamente ao segundo método, designado por *Branching on a route*, cada nó presente na árvore de pesquisa corresponde a uma única rota possível de ser efetuada, com um determinado conjunto de clientes.

¹ Termo NP que deriva do inglês *Non-Deterministic Polynomial Time*

Os autores testaram dez problemas para os dois métodos e com diferentes limites inferiores, em que o número de clientes variou entre $N=10$ até $N=25$ e todas as instâncias foram resolvidas até à solução ótima num tempo computacional aceitável. No entanto, os autores afirmam que o sucesso do método pode estar relacionado com os testes efetuados serem de pequenas dimensões e estarem relativamente livres de muitas restrições.

2.1.1.2 PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

Programação dinâmica, segundo Bellman (2013), consiste na repartição do problema principal numa série de subproblemas sobrepostos, onde a solução ao problema principal pode ser obtida através das soluções obtidas para os subproblemas criados. Assim, o método gera soluções para subproblemas de cada vez maiores dimensões, aproveitando-se da solução obtida anteriormente em subproblemas menores para um cálculo mais fácil.

Psaraftis (1980) desenvolveu duas versões de um algoritmo de Programação Dinâmica para problemas *Dial-a-Ride* apenas com recurso a um veículo e sem janelas de entrega consideradas. A primeira das versões foi desenvolvida para um caso estático do problema, onde o algoritmo apenas lida com pedidos de clientes que são conhecidos antes do início do cálculo de rotas. Já na segunda versão, o algoritmo desenvolvido para o caso estático é adaptado para resolver problemas dinâmicos, onde a abordagem aplica o algoritmo de programação dinâmica cada vez que surge um novo pedido, no entanto, apenas é reformulada a solução para clientes que ainda não tenham sido servidos, não se verificando alterações nas rotas até ao momento que o pedido chega.

O autor afirma que devido ao tempo computacional exponencial para problemas de Programação Dinâmica, apenas foi resolvido um problema em que foram considerados 10 serviços a efetuar.

2.1.1.3 PROGRAMAÇÃO INTEIRA (PI)

Consiste na criação de modelos matemáticos, baseados na descrição formal do problema de roteamento real, em que as variáveis de decisão apenas podem tomar valores inteiros e maiores ou igual a zero.

Deste modo, o modelo matemático possui uma função objetivo que representa a intenção real do problema, sendo muito frequente neste tipo de problemas a função estar ligada a minimização de custos de transporte, distâncias percorridas, tempos de processamento ou veículos utilizados. No entanto, o valor obtido para a função objetivo está sempre dependente e sujeita a restrições, também estas baseadas na situação real do problema.

De acordo com Geoffrion (1974), a forma geral para um problema de programação inteira linear deverá ser escrita da seguinte forma:

$$(F.O.) \quad \text{minimizar } Cx$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$Ax \geq e$$

$$Bx \geq d$$

$$x \geq 0$$

$$x \in \mathbb{N}$$

No que diz respeito a problemas de Programação Inteira, estes são normalmente resolvidos recorrendo a vários métodos. No entanto, serão apenas descritos os seguintes: algoritmos *Branch & Bound* (B&B ou BB), *Branch & Cut* (B&C ou BC), *Branch & Price* (B&P ou BP) e, por fim, método de Geração de Colunas.

2.1.1.3.1 BRANCH & BOUND (B&B OU BB)

Entre os métodos para solucionar problemas de programação inteira, destaca-se o método *Branch & Bound*.

Lawler and Wood (1966) descrevem o método como uma procura estruturada e inteligente no espaço de todas as soluções possíveis para um problema. Deste modo, o espaço de soluções é, de um modo contínuo, repartido em subconjuntos cada vez menores e no caso de a formulação matemática procurar minimizar a função objetivo, como é costume nos problemas de roteamento, é calculado um limite inferior para o custo de cada solução dentro de um subconjunto. Após cada repartição, todos os subconjuntos cujo limite exceda o valor de custo de uma solução possível já encontrada para o problema, são excluídos de ramificações seguintes. A ramificação continua até que uma solução possível seja encontrada e que o seu valor de custo não seja melhor que o limite calculado para todos os subconjuntos.

Laporte and Nobert (1983) formularam um modelo de programação inteira para um problema *CVRP*, em que existe uma quantidade não negativa de produtos associada a entidades, sejam cidades ou clientes, que deverá ser entregue com apenas uma única visita, utilizando um conjunto homogêneo de veículos cuja capacidade é conhecida e não deve ser ultrapassada. Neste modelo, a integralidade é obtida através de um procedimento *Branch & Bound* e todas as restrições de capacidade são sempre relaxadas até ao momento que são violadas.

Os autores examinaram três variantes básicas deste algoritmo e, foram obtidas soluções exatas para problemas em que a dimensão variou entre 15 e 50 clientes a visitar.

2.1.1.3.2 BRANCH & CUT (B&C OU BC)

De acordo com Mitchell (2011), os métodos de programação inteira podem ser resolvidos recorrendo a algoritmos *Branch & Cut*, que é um método exato de solução que combina o algoritmo *Branch & Bound* com um conjunto de planos de corte. Deste modo, Barnhart, Johnson, Nemhauser, Savelsbergh, and Vance (1998) assumem o método como uma generalização do método *Branch & Bound* juntamente com relaxações lineares, que permitem a separação e cortes numa árvore *Branch & Bound*.

Lysgaard, Letchford, and Eglese (2004) formularam um algoritmo para a resolução problemas de roteamento de veículos cuja capacidade de carga deve ser respeitada, ou seja, problemas *CVRP*. Este algoritmo recorre ao procedimento *Branch & Cut*, usando várias desigualdades, como a capacidade por exemplo, como planos de corte.

Várias instâncias de referência foram realizadas pelos autores, tendo sido obtidas soluções exatas, inclusive para três instâncias cuja solução ótima ainda não era conhecida, demonstrando assim que o algoritmo criado é bastante competitivo relativamente a outros métodos.

2.1.1.3.3 BRANCH & PRICE (B&P OU BP)

A filosofia do método *Branch & Price* é similar à do método *Branch & Cut*, no entanto, este procedimento foca-se em geração de colunas em vez da geração de planos de corte (Barnhart et al., 1998).

Christiansen and Lysgaard (2007) desenvolveram um algoritmo exato utilizando o procedimento *Branch & Price* para a resolução de problemas *CVRP* em que os clientes a visitar possuem procuras estocásticas. Os autores afirmam que o problema pode ser formulado como um problema de partição e, o subproblema associado à geração de colunas poderá ser obtido recorrendo a um método de programação dinâmica.

Os autores realizaram testes ao procedimento utilizando instâncias adaptadas de um conjunto de instâncias de referência, em que a dimensão dos problemas não era superior a 60 clientes. A instância de maiores dimensões resolvida com sucesso apresentava 60 clientes atribuídos a 16 rotas e, os autores afirmam que os resultados obtidos nos testes computacionais eram promissores.

2.1.1.3.4 BRANCH & CUT & PRICE (B&P&C OU BCP)

Ao contrário dos métodos *Branch & Cut* e *Branch & Price* que apenas recorrem a um dos procedimentos como planos de corte ou *pricing*, respetivamente, o método *Branch & Cut & Price* utiliza os dois procedimentos, uma vez que, como Barnhart et al. (1998) afirmam, planos de corte e *pricing* são procedimentos complementares para fortalecerem a relaxação linear.

De acordo com Fukasawa et al. (2006), os melhores métodos exatos para a resolução de problemas *CVRP* são baseados em procedimentos *Branch & Cut* ou Métodos de Geração de Colunas/ Relaxação Lagrangeana. Por essa razão, apresentam um novo algoritmo que combina as duas abordagens, combinando uma abordagem *Branch & Cut* juntamente com uma abordagem *q-routes*, que os autores interpretam como um procedimento de Geração de Colunas ao contrário da original Relaxação Lagrangeana.

Foram realizadas pelos autores as principais instâncias de teste da literatura e estes afirmam que os resultados computacionais obtidos provam que o algoritmo é bastante consistente, conseguindo resolver todas as instâncias até 135 vértices, garantindo também que 18 instâncias foram resolvidas pela primeira vez.

2.2 CLUSTERING

De acordo com Hansen and Jaumard (1997) e Estivill-Castro (2002), considera-se *clustering* o método que, a partir um grande conjunto de entidades heterogêneas, cria vários subconjuntos, designados por *clusters*, compostos por entidades homogêneas entre si e bem separadas das restantes. Desta forma, com a criação de *clusters* pretende-se que as entidades pertencentes a um dos grupos consigam representar as restantes entidades no mesmo *cluster*, seja qual for a mínima semelhança, mas também, se consigam diferenciar das entidades pertencentes aos *clusters* distintos.

Seguindo um exemplo de Steinbach, Ertöz, and Kumar (2004), a Figura 5 apresenta um conjunto de 30 entidades aleatórias e, dois exemplos de divisão do conjunto inicial. Assim, na situação A) da figura, é apresentado o conjunto principal das entidades sem qualquer divisão, enquanto que, na B) é apresentada uma situação de dois *clusters* e, por fim, na situação C) estão representados quatro *clusters* formados a partir do conjunto inicial.

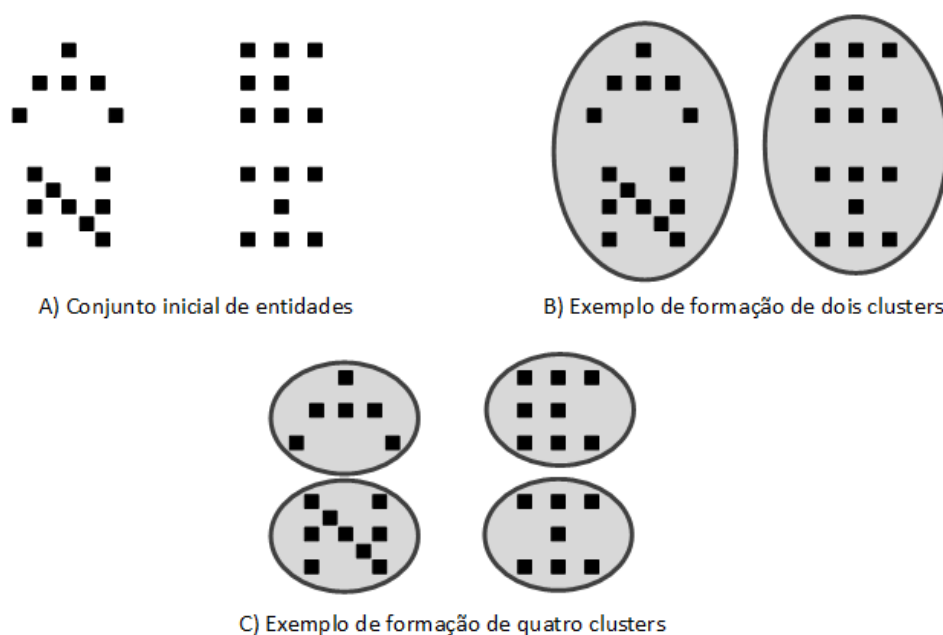


Figura 5 - Diferentes métodos de *clustering* para um conjunto de entidades (adaptada de Steinbach et al. (2004))

Ainda assim, como refere Estivill-Castro (2002), o termo *cluster* não tem uma definição totalmente precisa, o que faz com que existam diversos métodos de *clustering*, pois o autor considera que estes métodos são apenas formulações matemáticas cuja criação parte de princípios indutivos de quem lida com a situação real.

Importa referir que esta é uma área de conhecimento muito estudada, pois é essencial a várias áreas científicas, sobretudo para: agrupamento de dados e entidades, tomada de decisões, *data mining*, segmentação de imagens, análise e classificações de padrões (Jain, Murty, & Flynn, 1999).

No entanto, apesar da grande variedade de algoritmos e heurísticas, Jain et al. (1999) dividem os métodos de *clustering* em apenas dois tipos principais, sendo eles: Métodos Hierárquicos e Métodos de Partição. A Figura 6, é adaptada de Jain et al. (1999) e demonstra a taxonomia dos métodos de *clustering*.

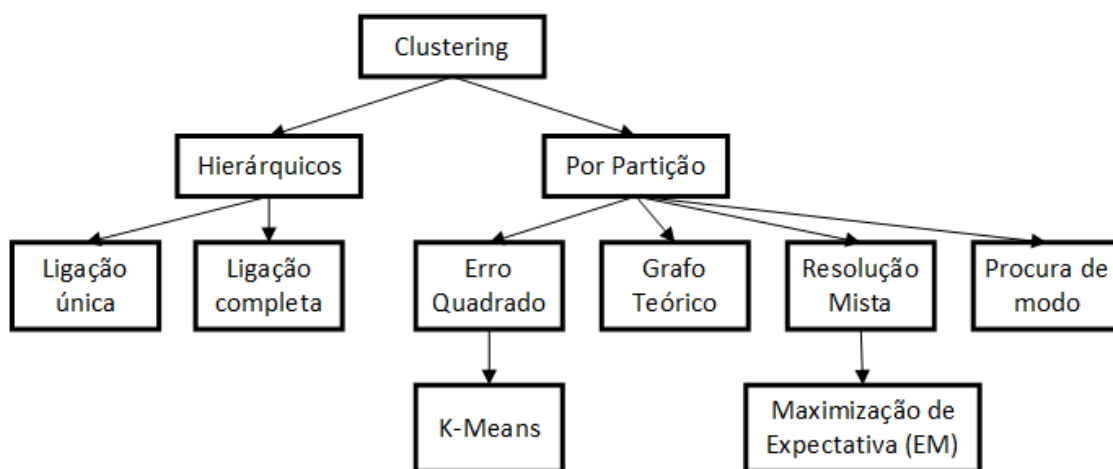


Figura 6 - Taxonomia dos métodos de *clustering* (adaptada para português de Jain et al. (1999))

Tal como o próprio nome indica, um método de *clustering* hierárquico representa num dendrograma, baseado em padrões e níveis de similaridade das entidades presentes no conjunto inicial, uma hierarquia das entidades de um conjunto. Deste modo, conforme o número de *clusters* que devam ser criados, ou de acordo com um nível de similaridade entre *clusters* estabelecido, o dendrograma pode ser quebrado a um determinado ponto e, da interseção da linha de quebra com as linhas do dendrograma resultarão os *clusters* (Jain et al., 1999).

A Figura 7, representa um método de *clustering* hierárquico, onde é possível visualizar um conjunto de entidades, à esquerda, que serão dispostas num dendrograma por níveis de similaridade, à direita. Quebrando o dendrograma a um nível de similaridade definido, ou de acordo com um número desejado de *clusters*, serão formados três *clusters*, que serão: um com as entidades A, E e N, outro com R e M e outro com G e B.

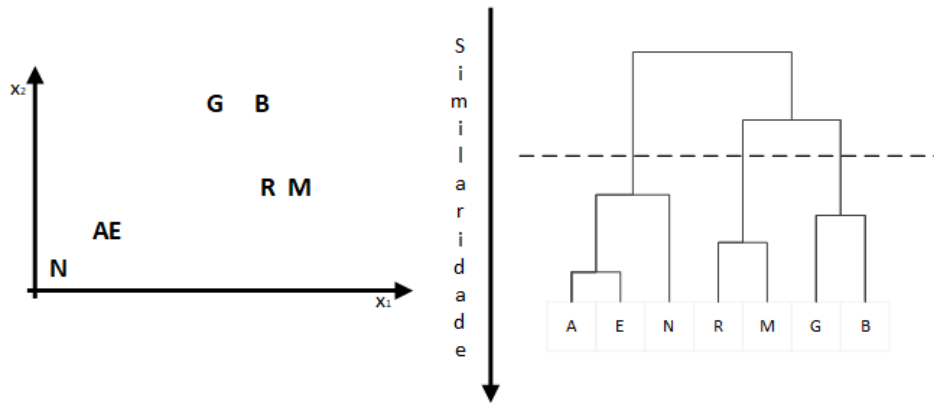


Figura 7 - Exemplo de um clustering hierárquico de ligação única (adaptada de Jain et al. (1999))

Relativamente à estrutura do dendrograma, os métodos de *clustering* hierárquicos que tenham o seu dendrograma iniciado por um *cluster* composto por todas as entidades e, sucessivamente, ramifica até *clusters* de entidades únicas, chamam-se de métodos *divisivos*. Caso o dendrograma se inicie com *clusters* únicos e vá emergindo a um *cluster* único, o método é designado por *aglomerativo* (Steinbach et al., 2004).

A Figura 8, representa os dois tipos de dendrogramas, à esquerda o divisivo e, à direita o aglomerativo.

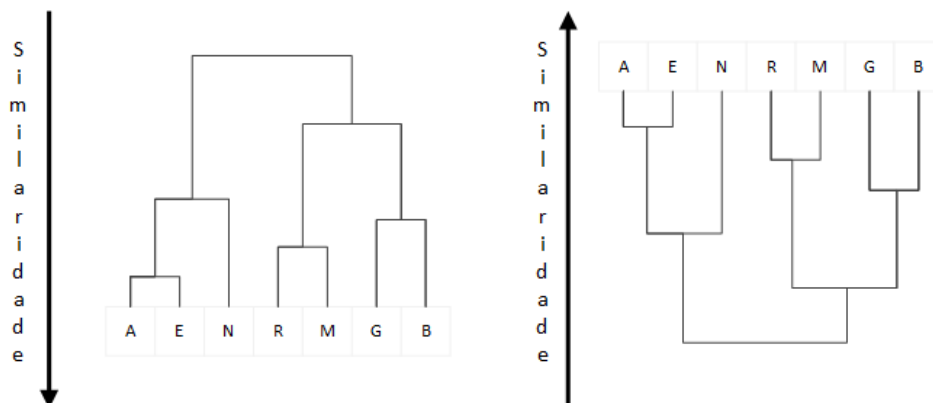


Figura 8 - À esquerda, método hierárquico divisivo e, à direita, método hierárquico aglomerativo

Ao contrário dos métodos hierárquicos, os métodos particionais efetuam uma divisão de todas as entidades apenas em um único nível e, desta forma, não necessitam da criação de uma hierarquia entre entidades. Assim, conforme o número de *clusters* desejados, um método de clustering por partição efetua uma divisão de todas as entidades de uma vez só (Jain et al., 1999; Steinbach et al., 2004).

Além das divisões em métodos hierárquicos e particionais, os métodos de *clustering* apresentam mais distinções, sendo elas: monotéticos ou politéticos, incrementais ou não incrementais, precisos ou imprecisos e, por fim, com ou sem sobreposição. A Tabela 2, descreve, resumidamente, estas distinções que os métodos de *clustering* podem apresentar.

Tabela 2 - Algumas distinções de métodos de *clustering* (baseado em Jain et al. (1999); Steinbach et al. (2004))

Distinções	Descrição
Monotético vs Politético	Os métodos monotéticos são métodos de <i>clustering</i> que apenas consideram um atributo para os <i>clusters</i> de cada vez, enquanto que, os politéticos criam <i>clusters</i> considerando todos os atributos de uma vez só.
Incremental vs Não incremental	São considerados métodos incrementais quando um algoritmo só tem acesso a uma entidade de cada vez para criar <i>clusters</i> e vai mudando sucessivamente de entidade e, são não incrementais quando o algoritmo cria <i>clusters</i> tendo acesso a todas as entidades numa única vez.
Preciso vs Impreciso (<i>Hard vs Fuzzy</i>)	Métodos de <i>clustering</i> precisos são aqueles em que uma entidade está em apenas um <i>cluster</i> durante e no final do cálculo, enquanto, métodos imprecisos (<i>Fuzzy</i>) são aqueles em que uma entidade possui graus de associação a diferentes <i>clusters</i> . Um método impreciso de <i>clustering</i> pode sempre ser convertido num método preciso ao associar todas as entidades ao <i>cluster</i> que estas possuem maior grau de associação.
Com sobreposição vs Sem sobreposição	Um método de <i>clustering</i> com sobreposição caracteriza-se por existirem entidades que pertencem a mais que um <i>cluster</i> , enquanto que, num método sem sobreposição cada entidade pertence a um único <i>cluster</i> . É importante não confundir métodos com sobreposição com métodos imprecisos, pois são métodos diferentes.

Feita uma descrição sobre *clustering*, bem como, as várias distinções existentes entre métodos, serão de seguida descritos alguns métodos específicos de repartição. Uma vez que este trabalho está ligado a problemas de roteamento, serão apenas apresentados métodos de *clustering* que sejam de alguma forma utilizados para solucionar este género de problemas.

Sabendo que, quando é utilizado um método exato de roteamento para problemas de elevadas dimensões, isto é, com vários veículos e clientes, o tempo de cálculo é bastante elevado, o que não acontece em problemas pequenos. A utilização de um método de *clustering* poderá permitir uma divisão lógica das entidades, que irá transformar o problema inicial em vários problemas de menores dimensões, cujo tempo de cálculo será bastante aceitável.

Desta forma, quando se recorre a um método exato para a resolução de um problema *VRP*, é usual a utilização de um método de *clustering* que irá permitir uma diminuição do tempo total de cálculo, devido a uma diminuição do número total de restrições, bem como, o número de variáveis de decisão binária do modelo matemático (Dondo & Cerdá, 2007).

No entanto, é importante referir que a partir do momento em que é necessária a utilização de um método de *clustering*, embora continue a ser utilizado um modelo exato de programação inteira para o roteamento de cada *cluster*, a abordagem ao problema inteiro, deixa de ser considerada como um método exato e passa a ser considerada uma heurística.

No que diz respeito ao *clustering* aplicado a problemas de roteamento, este está normalmente ligado a agrupamento de entidades, que podem ser clientes ou cidades, por uma divisão territorial ou agrupamento das mesmas por atribuição a determinados veículos.

Serão, em seguida, apresentados métodos heurísticos de duas fases para a resolução de problemas *VRP* que recorrem a métodos de *clustering* como *K-Means*, mas também outros métodos desenvolvidos ou utilizados por diversos autores.

2.2.1 MÉTODO K-MEANS OU K-MÉDIAS

O método *K-Means*, ou *K-Médias*, é o método de *clustering* por partição mais intuitivo e mais utilizado, que funciona recorrendo ao critério de erro quadrático. Existem várias abordagens a este método, no entanto será apenas descrita a abordagem mais básica e a mais utilizada (Jain et al., 1999; Steinbach et al., 2004).

Assim, existindo um conjunto de entidades, deverá ser definido um número k de centróides, número que irá estabelecer também o número de clusters a criar, e todas as entidades deverão ser associadas ao cluster com centróide mais próximo. Em seguida, devem ser calculados os novos centróides e, uma vez calculados, todas as entidades deverão ser novamente associadas ao cluster com centróide mais próximo. Este passo é repetido, as iterações necessárias, até que os centróides dos clusters não variem de posição, ou até que existam mudanças de posição mínimas, mas não haja transferência de entidades entre clusters (Steinbach et al., 2004).

Nallusamy, Duraiswamy, Dhanalaksmi, and Parthiban (2010) desenvolveram um método heurístico de duas fases para resolver problemas de roteamento com múltiplos veículos que devem fornecer um conjunto de cidades definidas.

Na primeira fase do método, é efetuado um *clustering* que irá agrupar as cidades em determinados veículos utilizando o método *k-means* e, deste modo, o número k de *clusters* a criar é igual ao número de veículos disponível para o roteamento. Já na segunda fase, após as cidades a abastecer estarem devidamente atribuídas a veículos, é utilizada uma abordagem meta-heurística através de um algoritmo genético, que efetua uma otimização da rota que cada veículo deverá efetuar.

O método foi testado pelos autores numa situação em que foram geradas aleatoriamente coordenadas para 180 cidades num espaço de 35x35, para serem alocadas em 6 veículos, isto significa que deveriam ser criados 6 *clusters*.

Os autores afirmam que o método de *clustering k-means* provou ser eficiente, pois gerou *clusters* duma maneira ótima e num tempo computacional curto. Já o algoritmo genético, provou ser capaz de obter melhores resultados para o problema que outros métodos heurísticos e em tempos computacionais muito reduzidos relativamente a métodos exatos como o *Branch & Bound* e *Branch & Cut*.

2.2.2 MÉTODO DE GILLETT & MILLER

Uma das primeiras heurísticas de roteamento que recorrem ao método *cluster first – route second*, foi a desenvolvida por Gillett and Miller (1974) que é baseada num algoritmo *sweep*. Este método está destinado a problemas de roteamento onde os veículos saem de um depósito central, para efetuar o abastecimento de produtos a um conjunto de clientes com localizações distintas. O objetivo desta heurística é minimizar a distância a percorrer pelos veículos para efetuarem todas as entregas, sendo que, o objetivo estará sempre limitado pelas restrições de capacidade e de distância de todos os veículos.

De uma forma simples, o método desenvolvido consiste numa divisão do problema em dois subproblemas, onde o primeiro está responsável pela atribuição de clientes a rotas, enquanto que, o segundo terá o objetivo de minimizar a distância total de cada rota. No entanto, existem dois tipos de algoritmos semelhantes, *forward-sweep* e *backward-sweep*.

No primeiro dos algoritmos, o ângulo das coordenadas polares de cada um dos clientes relativamente ao depósito é calculado e, no final, são ordenados de forma ascendente. Em seguida, a primeira rota é iniciada com o cliente que possua o menor ângulo relativamente ao depósito, depois o segundo cliente que possua menor ângulo, e assim sucessivamente, até que a procura total da rota não exceda a capacidade do camião. Uma vez terminada a criação de uma rota, é utilizado um algoritmo *TSP* para determinar o percurso ótimo para visitar todos clientes atribuídos na primeira rota. Caso a distância calculada for superior à máxima distância que um veículo poderá percorrer, o último cliente adicionado à rota será retirado e será utilizado novamente o algoritmo *TSP* para a obtenção da distância e ordem ótima da rota. No final, o procedimento tenta ainda efetuar trocas entre uma das localizações pertencentes à rota calculada com uma ou mais localizações não pertencentes à rota atual. Qualquer permutação só é efetuada caso se verifique uma redução da distância total a percorrer. O método termina quando todas as localizações que foram introduzidas para o roteamento estejam atribuídas a qualquer uma das rotas. No que diz respeito ao *backward-sweep*, é um método similar ao *forward-sweep*, no entanto, a atribuição de clientes a rotas é efetuada na ordem inversa, isto é, após calculados os ângulos entre as coordenadas polares e o depósito, estes são colocados por ordem descendente e a rota inicia-se com o ângulo maior. Os passos restantes do procedimento, são exatamente iguais ao método *forward-sweep*.

Relativamente a resultados, o método foi testado pelos autores para resolver diversas instâncias de problemas de roteamento em que o número de locais a visitar variou entre 10 a 250. Em situações, em que era possível uma comparação com outros métodos, para instâncias grandes com mais de 50 clientes a visitar provou ser capaz de obter melhores soluções, no entanto o tempo de cálculo provou ser um pouco maior devido a este aumentar quadraticamente em relação ao número de clientes inseridos em cada rota. Para instâncias mais pequenas, os autores garantem que provou ser uma solução ao nível dos melhores algoritmos de roteamento da altura, no que diz respeito a tempo computacional, bem como, em termo da qualidade das soluções.

2.2.3 MÉTODO DE FISHER & JAIKUMAR

Em 1981, Fisher and Jaikumar (1981) desenvolveram uma heurística de roteamento, considerando uma versão comum de um problema *VRP*, onde um conjunto de veículos efetua entregas de produtos, que estão armazenados num depósito, para satisfazerem a procura de clientes. Cada veículo tem a sua capacidade definida e cada cliente usa uma porção fixa dessa capacidade.

O método desenvolvido por Fisher and Jaikumar (1981), é composto por duas fases, onde a primeira delas é destinada ao *clustering* das entidades através um problema de atribuição generalizada, mais conhecido por *GAP – Generalized Assignment Problem*. Deste modo, os clientes são atribuídos a veículos através de um problema de programação inteira, respeitando sempre a restrição que o total da procura dos clientes terá de ser inferior à capacidade do veículo. Uma vez terminada a atribuição de clientes a veículos, a segunda fase está destinada à realização de um problema *TSP*, seja através de uma heurística ou de um método exato, de forma a que todos os veículos tenham uma rota que permita minimizar os custos de transporte.

Na criação desta heurística, os autores testaram 12 instâncias em que o número de clientes, n , variou entre 50 e 199 e o número de veículos, k , variou entre 3 e 19. Como os próprios autores descrevem, os resultados obtidos foram excecionais e, o método superou as melhores heurísticas existentes, tanto a nível computacional como em termos de qualidade das soluções.

2.2.4 MÉTODO DE DONDO & CERDÁ

Em 2007, Dondo and Cerdá (2007) desenvolveram um método de resolução para problemas de roteamento, recorrendo a múltiplos depósitos e a um conjunto heterogéneo de veículos para entrega de produtos a um conjunto de entidades com janelas temporais estabelecidas.

Como os próprios autores confirmam, as abordagens de otimização conseguem resolver eficientemente instâncias apenas para um total de 25 entidades, o que por vezes se torna insuficiente. Assim, para ultrapassar esta limitação, desenvolveram um método que está dividido em três fases, sendo uma relativa a um método de *clustering* e duas delas responsáveis pela atribuição e sequenciamento de *clusters* e entidades.

A primeira fase do método tem como objetivo reduzir o tempo computacional, bem como a carga das duas fases seguintes. Este objetivo é obtido através da criação de pequenos *clusters* possíveis, isto é, a realização de uma rota com os clientes dentro do cluster é possível, uma vez que as restrições são verificadas. Numa segunda fase, os *clusters* que foram previamente criados serão submetidos a um algoritmo de programação linear inteira mista, *VRPTW* – *Vehicle Routing Problem with Time Windows*, para serem devidamente atribuídos a veículos e a um dos depósitos. Também nesta fase e no correr do algoritmo, cada veículo irá obter um sequenciamento dos *clusters* que deverá abastecer.

Por fim, a terceira e última fase está destinada a ordenar os clientes dentro de cada rota criada para cada veículo, bem como, definir os tempos de chegada dos veículos a cada cliente a ser abastecido. Esta fase, recorre também a um algoritmo de programação linear inteira mista, mas neste caso, como incide sobre um veículo de cada vez, o problema a resolver é um *TSPTW* – *Travel Salesman Problem with Time Windows*.

A Figura 9, é um esquema adaptado do trabalho os autores que representa o método desenvolvido.

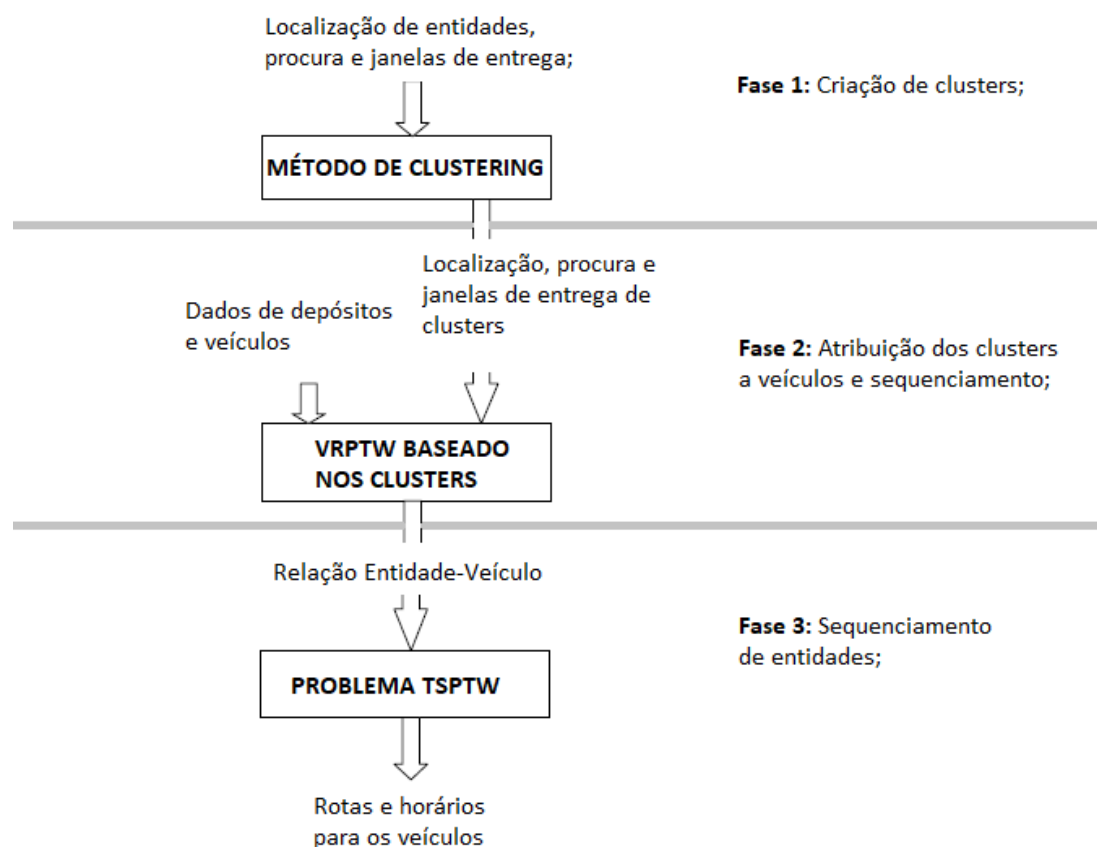


Figura 9 - Esquema do método de Dondo and Cerdá (2007)

No que diz respeito a resultados, os autores garantem que o método de três fases desenvolvido é uma abordagem tão robusta como os métodos exatos e capaz de resolver instâncias até 100 entidades a um tempo de cálculo computacional aceitável.

Os autores afirmam ainda que o método provou também ser bastante bom em instâncias de benchmarking em que apenas existia um depósito e um conjunto de veículos homogêneos e, para outro conjunto de problemas de dimensão variável, foram sempre obtidas soluções ótimas ou perto do ótimo, sendo que neste caso o valor encontrava-se dentro de limites aceitáveis.

2.2.5 MÉTODO DE BEASLEY

Até este ponto foram apresentados métodos para problemas de roteamento de veículos recorrendo inicialmente ao *clustering* das entidades, para só depois se efetuar o roteamento para cada *cluster*, daí a designação *cluster first – route second*.

No entanto, em 1983, Beasley (1983) sugeriu um método para resolver um problema de roteamento para abastecer um conjunto de clientes com um conjunto de veículos homogêneos e, apenas com recurso a um depósito central, que numa primeira fase efetua um roteamento e, só depois o divide em pequenos *clusters*. Este método é então descrito como *route first – cluster second*.

Na primeira fase do método, é criada uma rota gigante, com início e fim no depósito, visitando todos os clientes. Esta rota é normalmente obtida através de uma relaxação das restrições de capacidade e de distância de um veículo de um problema *TSP*, no entanto pode ser obtida por outros métodos. Em seguida, define-se a direção da rota e, deste modo, fica definido o primeiro cliente a ser visitado, este será denominado por 1 visto o depósito ser definido pelo número 0, e também o último cliente, definido pela letra *U*.

Para proceder ao *clustering* da rota gigante, considerando veículos homogêneos, o método recorre ao cálculo do caminho mais curto num grafo direcionado com origem no depósito 0 e final no cliente *U*, que pode ser calculado através do algoritmo de Dijkstra, para dividir o grafo total em rotas possíveis de acordo com um custo calculado. Deste modo, se o caminho mais curto for, por exemplo, $0 - i - m - U$, sendo que *i* e *m* correspondem a índices de clientes presentes na rota gigante, sabe-se que a primeira rota, e assim primeiro *cluster*, irá envolver os clientes 1 até *i*, a segunda inclui os clientes *i*+1 até *m* e, por fim, a terceira rota com os clientes *m*+1 até *U*.

Foram efetuados pelo autor cálculos para 10 instâncias, em que o número de clientes variou entre 6 e 100, gerando 25 rotas gigantes aleatoriamente para cada instância para efetuar uma comparação entre custos calculados pelo método. O autor afirma que os resultados são muito encorajadores, pois garante resultados balanceados relativamente a outros métodos heurísticos e, por vezes, tão bons como soluções exatas, sempre com um tempo de cálculo computacional razoável por cada iteração.

DESCRIÇÃO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA REAL

3.1.1 FROTAS DISPONÍVEIS

3.1.2 MODELO DE DISTRIBUIÇÃO ATUAL

3.1.3 MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DESEJADO

3.2 CRIAÇÃO DE UMA FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO

3.2.1 CUSTOS DO SERVIÇO DE TRANSPORTE

3.3 CLUSTERING PARA A FROTA SUBCONTRATADA

3.4 ABORDAGENS AOS PROBLEMAS E MODELO MATEMÁTICO

3 DESCRIÇÃO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo, é feita uma descrição de todo o trabalho desenvolvido durante o estágio efetuado na empresa para a elaboração de uma ferramenta de apoio à decisão para o roteamento de entregas.

Inicialmente, é descrito o problema encontrado na empresa e é apresentada uma explicação das expectativas da empresa com a realização deste projeto/estágio.

Em seguida, é apresentada a ferramenta de apoio à decisão, com o método de distribuição desenvolvido para a solução do problema.

3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA REAL

Com a criação de um departamento logístico, este vê-se obrigado a assumir a responsabilidade de criar um novo modelo de distribuição de produto acabado ao cliente que seja mais eficiente, que combata as lacunas do modelo atual e, desta forma, com custos mais baixos comparativamente com aqueles que são praticados atualmente.

Para uma melhor compreensão das condições logísticas da empresa, o problema no modelo de distribuição, assim como o modelo de distribuição que a empresa deseja criar, este subcapítulo está dividido em três partes.

A primeira parte é dedicada a caracterizar a frota própria e subcontratada da empresa, definindo a quantidade e o tipo de veículos que são utilizados para as entregas, incluindo também a definição dos clientes alvo para este tipo de frotas.

Na segunda parte, é apresentada uma descrição do modelo de distribuição que a empresa usa atualmente, com especial atenção para todas as suas lacunas.

Por fim, na terceira e última parte, é descrito o modelo de distribuição proposto para a empresa para colmatar as lacunas do modelo atual com especial atenção para importância que a criação de um método de roteamento adequado terá neste novo modelo.

3.1.1 FROTAS DISPONÍVEIS

Até ao início do projeto tinha sido feita a distinção entre frota própria e frota subcontratada. No entanto, dos modelos de distribuição de produto acabado, tanto o atual como o modelo pretendido para o futuro, deverão ser conhecidas as frotas utilizadas para os transportes serem efetuados.

Assim, a empresa em questão possui uma reduzida frota própria de três veículos, com as características apresentadas na Tabela 3. A atual frota é suficiente, na grande parte dos dias em que é solicitada para abastecer o conjunto de clientes alvo.

Tabela 3 - Características da Frota Própria da empresa

Quantidade de veículos	Marca e Modelo	Peso Bruto [kg]	Tara [kg]	Capacidade de carga [kg]	
1	Mercedes-Benz (970 06)	1318	13500	6340	7160
2	Mercedes-Benz 416 CDI	3500		2800	700

Como foi referido, devido às limitações que apresenta, a frota própria deverá apenas ser utilizada para abastecer um grupo limitado de clientes da empresa.

Para serem abastecidos por este tipo de veículos, os clientes devem respeitar duas condições impostas pela direção, sendo elas: as infraestruturas dos clientes deverão pertencer aos distritos de Braga, Porto e Viana do Castelo. Isto é, deverão ser próximos da localização da fábrica porque, desta forma, como as distâncias a percorrer serão menores, é possível efetuar várias entregas diariamente em cada veículo. Além disso, as encomendas a transportar não deverão ser de grandes quantidades, de forma a permitir que a encomenda possa ser entregue por pelo menos, um dos três veículos próprios.

Além das condições impostas pela empresa, este grupo de clientes vê as suas encomendas serem entregues pela frota própria por ser um serviço de entrega menos impessoal do que com frota subcontratada. Este pormenor faz com que os clientes se sintam mais acarinhados pela empresa e mais satisfeitos com o serviço. Devido a serem clientes com encomendas de pequena ou média quantidade, usualmente isso indica que são clientes que possuem infraestruturas pequenas sem plataformas de abastecimento de mercadorias (como por exemplo os minimercados), pelo que a entrega deverá ser feita com veículos de pequenas dimensões e não com veículos de grande volumetria. De certo modo relacionado com a razão anterior, estes são também clientes cuja localização do ponto de entrega de encomenda coincide com o centro de cidade, pelo que não seria possível, ou até mesmo justificável, o acesso com um veículo longo.

Paralelamente, esta é uma empresa que apresenta um número elevado de entregas a efetuar diariamente, pois em média são fornecidos 50 clientes, estando estes localizados maioritariamente em Portugal Continental e Ilhas. Existe também uma necessidade de transporte de mercadoria para clientes localizados no continente europeu e outros destinos. Importa referir que existe um número apreciável de entregas a efetuar com elevadas quantidades a fornecer em grandes superfícies comerciais. Devido a estes factos e às razões apontadas acima para a frota própria, é forma a todos os clientes poderem ser abastecidos com os produtos encomendados, é

necessário recorrer a empresas subcontratadas, especializadas em logística e transporte de mercadorias. Assim as necessidades identificadas em termos de veículos de transporte pesado de grande volumetria são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características de veículos de frota subcontratada

Quantidade de veículos	Peso Bruto	Carga Útil	Capacidade em Paletes
Necessária para abastecer todos os clientes	40 toneladas	24 toneladas	33

Desta forma, estão assim caracterizados os dois tipos de frota que têm sido usados no modelo de distribuição atual, bem como deverão continuar a ser utilizados na proposta de modelo de distribuição futuro.

3.1.2 MODELO DE DISTRIBUIÇÃO ATUAL

Na atualidade, a empresa apresenta um modelo de distribuição de produto acabado muito rudimentar e, com a criação de um departamento logístico surge, como um dos principais objetivos, a necessidade de se implementar um modelo de transporte mais eficiente.

Assim sendo, o modelo de distribuição atual caracteriza-se pelo uso da frota própria para fornecer um grupo de clientes específico e, para fornecer os restantes clientes a empresa recorre a uma empresa especializada em transporte, como foi referido anteriormente. Este modelo de distribuição, apesar de fazer uma divisão justificada das entregas, sofre de várias lacunas, tanto ao nível de frota própria como de frota subcontratada.

Começando pela frota própria, esta não apresenta nenhum método de roteamento que defina rotas diárias para os veículos dependendo das entregas que serão necessárias a efetuar, ou até mesmo, rotas fixas de cidades a visitar em determinado dia da semana, o que implicaria que os clientes aceitassem ser fornecidos em dias fixos consoante as rotas.

No entanto, não havendo trajeto definido previamente ou ordens de direção e da empresa, as rotas diárias são definidas por senso comum dos motoristas da empresa com base na quantidade das encomendas, a capacidade dos veículos e a proximidade dos clientes em que as entregas serão efetuadas. Além disto, apesar de haver um piquete responsável por recolha/envio de correio ou recados da empresa, praticamente todos os dias, além da entrega de encomendas, os motoristas têm também responsabilidade de efetuar recados da administração em diversos locais.

Estes dois aspetos enunciados fazem com que os trajetos a percorrer não sejam ótimos, pois apesar de haver um bom conhecimento territorial por parte dos condutores dos veículos, não há um conhecimento ideal da ordem que as entregas

devam ser efetuadas para minimizar a distância de entrega, para além disso, a inclusão de tarefas de outros departamentos/profissionais no processo de transporte implicam desvios nos percursos e, conseqüentemente, quilómetros extra percorridos que geram custos desnecessários.

A existência de percursos diários maiores que aquilo que seria suposto e, devido a tempo perdido com tarefas que não entregas de encomendas de produto acabado, leva a que alguns clientes que deveriam ser fornecidos pelos veículos próprios não o sejam. Ou seja, caso o processo de transporte atual fosse apenas dedicado a entregas de produto acabado, seria possível efetuar muitas mais entregas diariamente e, abranger muitos mais clientes com a frota própria do que aqueles que são realizados atualmente.

Já relativamente à frota subcontratada, o problema reside no insuficiente controlo sobre o processo de transporte de mercadoria. No modelo que está aplicado atualmente, a empresa tem apenas controlo no número de veículos subcontratados diariamente de acordo com o volume de entregas a efetuar, ficando a empresa subcontratada responsável pela entrega e manuseamento do produto acabado.

Assim sendo, na atualidade, a fábrica tem apenas a preocupação de requisitar veículos para a entrega do produto acabado à frota subcontratada. Após o produto estar em posse da empresa de logística no seu entreposto, esta decide a melhor estratégia para o entregar ao cliente no prazo limite. Isto significa então que, na fração custo de entrega estará incluído o transporte, bem como, o manuseamento da mercadoria. A direção da empresa está convencida que esta estratégia, tem também as suas lacunas, entre elas, a falta de controlo e poder de decisão sobre as entregas a efetuar que, conseqüentemente, geram custos mais elevados.

A falta de controlo e poder de decisão sobre as entregas a efetuar é a principal razão pela qual a frota subcontratada apresenta deficiências, pois a empresa não consegue controlar nenhuma rota a percorrer e, conseqüentemente, se as entregas efetuadas são diretas ou via entreposto. Entregas diretas ao cliente acontecem quando os veículos saem da fábrica em direção a um ou mais clientes, enquanto que, transporte via entreposto acontece quando os veículos saem da fábrica para o entreposto da empresa de transporte, e só a partir daí partem para os clientes.

Deste modo, a falta de controlo das distribuições da frota subcontratada levou a que atualmente se realizem apenas entregas via entreposto, não havendo presentemente qualquer entrega diretas com origem na fábrica produtiva e com destino a clientes.

Assim, com apenas a realização de entregas via entreposto os custos de transporte praticados são elevados, pois a empresa é taxada por cada recolha de mercadoria que diz respeito à saída e ao retorno do veículo de carga ao entreposto, mas também, é cobrada por cada entrega a efetuar a qualquer cliente com saída do entreposto. Deste modo, no preço cobrado pela empresa de transporte estão incluídas duas componentes: o transporte, bem como, o manuseamento da mercadoria.

Sendo que grande parte das entregas poderiam ser efetuadas diretamente a partir da fábrica sem a necessidade de se recorrer ao entreposto, poderia ser alcançado um custo mais reduzido que aquele que é praticado atualmente. Isto significa que deveria ser cobrado um custo apenas relativo ao transporte, sendo assim descontada, tanto nas tarifas de recolha de mercadoria como nas tarifas de entrega, a componente do manuseamento e armazenamento de mercadoria do custo total da entrega.

Um exemplo concreto é o seguinte. Pela atual estratégia utilizada pela empresa subcontratada, praticamente todos os dias deverão ser efetuadas entregas a clientes situados em Vila Nova de Famalicão (cidade em que se localiza a fábrica), na cidade da Maia ou até mesmo na cidade do Porto. Uma vez que o entreposto da empresa de logística fica situado em Vila Nova de Gaia, ou seja, os clientes que ficam no trajeto entre Fábrica – Entreposto poderiam ser abastecidos logo que os veículos saíssem da Fábrica em direção ao entreposto. Um segundo exemplo, é necessário fornecer todos os dias vários clientes de grandes superfícies comerciais, na zona da Azambuja, com encomendas de grandes volumes e elevadas quantidades, encomendas essas que quando carregadas perfazem veículos completos que poderiam sair diretamente ao cliente. No entanto, em ambos os casos descritos, assim que a carga é colocada no veículo, toda a mercadoria é levada em direção ao entreposto para mais tarde ser efetuado o percurso extra para os clientes serem abastecidos e, desta forma poder-se cobrar o custo total da entrega que inclui o custo de transporte e manuseamento.

Resumidamente, o modelo de distribuição atual encontra-se dividido pelas entregas realizadas pela frota própria bem como pelas entregas realizadas através da frota subcontratada. No que diz respeito ao transporte próprio, este é realizado diretamente a partir da fábrica até clientes que se situem nas proximidades da fábrica e que possuam encomendas de baixo volume e quantidade. No entanto, não apresenta nenhum método de roteamento e opera a um nível mais baixo que a capacidade disponível. Já relativamente ao transporte subcontratado, este é utilizado para abastecer clientes de grandes superfícies comerciais, mas também, clientes que se apresentam distantes da infraestrutura da empresa. No entanto, esta segunda opção tem a particularidade de apenas ser realizado recorrendo ao entreposto da empresa subcontratada, o que resulta em custos elevados por serem cobrados tanto o custo de transporte como o custo de manuseamento, o que na maioria dos casos é desnecessário

3.1.3 MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DESEJADO

Com a criação de um departamento logístico, surgiu a necessidade de se criar um modelo de distribuição de produto acabado mais eficiente, que vá de encontro aos interesses deste novo departamento e, sobretudo, da empresa. Assim sendo, o objetivo passa pela criação de um novo modelo que tenha a gestão da distribuição centrada num único responsável pelo processo de transporte, cargo que deverá ser criado, e não baseado na intuição dos motoristas da empresa ou na vontade de

empresas de transporte e logística subcontratadas. Assim, o novo modelo de distribuição deverá ser capaz de eliminar todas as deficiências apresentadas anteriormente no modelo de distribuição atualmente.

Partindo do objetivo de eliminar os pontos negativos presentes no modelo atual, o novo modelo de distribuição, necessita de enquadrar as funções dos motoristas da frota própria da empresa numa lógica de ganho de eficiência. Estes ficam apenas responsáveis por efetuar entregas de produto acabado, passando assim a entrega de informações e outros trabalhos de carácter administrativo para outros profissionais da empresa como, por exemplo, os piquetes. Com esta medida, o departamento logístico pretende que seja possível efetuar um maior número de entregas diariamente comparativamente com aquelas que têm sido feitas atualmente. Consequentemente com esta medida é possível alargar a lista de clientes que são fornecidos pela frota própria (respeitando sempre as condições impostas pela empresa).

Já relativamente à centralização da gestão dos transportes, haverá neste novo modelo um responsável que ficará encarregue por gerir todas as encomendas de produto acabado, efetuar todos os roteamentos necessários que garantam a entrega dessas mesmas encomendas ao cliente e, fazer a gestão e o uso apropriado de cada transporte relativamente a cada rota. Isto significa que deverá ser capaz de definir se o veículo utilizado será de frota própria ou subcontratada e, no caso de ser subcontratado, se é direto ou via entreposto.

Com a gestão centralizada dos transportes no departamento logístico da empresa, mais concretamente no responsável de transporte, a empresa vê-se obrigada à criação de um método de roteamento, motivo esse, que conforme descrito anteriormente, sustenta a realização deste projeto/estágio. Este método servirá para combater as deficiências apresentadas atualmente na frota própria, em que as rotas são definidas por senso comum dos condutores, e na frota subcontratada, onde atualmente a empresa não tem o mínimo controlo sobre as rotas, especialmente por não ter entregas diretas ao cliente, tipo de transporte que o departamento logístico deseja passar a ter.

Deste modo, sendo o roteamento uma tarefa muito complexa, morosa e que requer conhecimento e estudo, é necessário desenvolver um sistema de apoio à decisão que visa apoiar o decisor, neste caso, o responsável pelo transporte a tomar melhores decisões relativamente a todo o processo de transporte de produto acabado a efetuar.

Assim sendo, com a centralização da gestão num responsável e com um método de roteamento que irá permitir definir rotas diretas utilizando os dois tipos de frota, o novo modelo de distribuição estará agora repartido em três tipos de distribuição, sendo eles: o transporte direto ao cliente com uso da frota própria, o transporte direto ao cliente com uso de frota subcontratada e, por fim, o transporte via entreposto com o uso de frota subcontratada.

Resumindo, no novo modelo de distribuição, a frota própria da empresa será apenas utilizada para abastecer o grupo de clientes selecionados conforme as condições

impostas pela empresa, sendo que toda a gestão desta frota como, por exemplo, as rotas ou atribuição de mercadorias e motoristas a veículos, passa a ser feita pelo responsável dos transportes e, todos os outros encargos de carácter administrativo efetuados por outros responsáveis. Já relativamente à frota subcontratada, esta deverá ser utilizada para abastecer os restantes clientes assim como acontece no modelo de distribuição atual. No entanto, além das entregas via entreposto, que existem atualmente, irão ser exploradas soluções de rotas de abastecimento direto ao cliente para evitar custos acrescidos com manuseamento de mercadoria, recorrendo ou não à mesma empresa de transporte que tem sido subcontratada.

No que diz respeito ao método de roteamento, este deverá ser suportado por uma ferramenta, que será usada pelo responsável de transporte. Esta ferramenta deverá ser capaz de efetuar um roteamento eficiente que minimize os custos do transporte, quer a nível de frota própria, bem como, relativamente à frota subcontratada. Apenas no caso da frota subcontratada, o valor custo obtido pela rota calculada através da ferramenta deverá ser sempre comparado com o cenário das entregas dessa rota serem efetuadas via entreposto, escolhendo o responsável de transporte neste caso o cenário com custo mais baixo. Assim, no método proposto, procura-se que ferramenta seja de apoio à decisão, sendo que dará soluções exatas para os cenários estudados, mas será sempre necessária a decisão final do responsável pela escolha do tipo de transporte a efetuar.

3.2 CRIAÇÃO DE UMA FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO

Devido à distribuição de produto acabado da empresa ser efetuada através da frota própria e frota subcontratada, o problema de roteamento está dividido em dois subproblemas paralelos, o subproblema correspondente ao roteamento da frota própria e, o roteamento para entregas de frota subcontratada. Com esta divisão, o problema médio de 50 entregas diárias divide-se da seguinte forma: entre 15 a 20 entregas diárias para a frota própria e, de 30 a 35 entregas diárias à frota subcontratada.

No que diz respeito à frota própria, esta possui um raio de ação bastante reduzido, uma vez que abastece apenas um conjunto específico de clientes, com características muito semelhantes e que estão situados nos distritos próximos à localização da empresa, como já foi referido. Assim sendo, será aceitável que numa situação, um veículo da frota própria tenha que abastecer clientes pertencentes aos três distritos alvos, sendo eles Braga, Porto e Viana do Castelo.

O mesmo raciocínio já não se verifica para a frota subcontratada, visto o raio de ação ser muito mais alargado e o conjunto de clientes ser muito heterogéneo. Desta forma, não será aceitável que um ou mais veículos da frota subcontratada, possuam rotas em que os clientes a abastecer pertencem a zonas completamente distintas. Isto significa que um veículo não deverá ter uma rota em que saia do depósito, localizado em Vila

Nova de Famalicão, para abastecer clientes, por exemplo, de Bragança, Figueira da Foz e Portalegre, só porque esta situação minimiza a distância a percorrer considerando a totalidade de entregas a efetuar pela frota subcontratada.

Uma outra situação, ainda referente ao roteamento da frota subcontratada surge ligada ao uso desnecessário de veículos. Quando se efetua um roteamento para uma frota de veículos com um raio de ação de grandes dimensões, como é o caso, é necessária a utilização de restrições de distância e ou tempo de serviço de uma rota para que a mesma possa ser efetuada num dia de trabalho. Assim sendo, para que o cálculo de rotas seja possível, sem serem violadas as restrições de distância ou capacidade, o número de veículos a utilizar no cálculo do modelo matemático deverá ser superior ao número de veículos necessários para abastecer a procura de todos os clientes. O uso deste majorante provoca a criação de rotas com poucos clientes e veículos com pouca carga o que, conseqüentemente, irá resultar numa decisão muito mais complicada para o responsável pelo transporte.

No modelo de distribuição desejado, a frota subcontratada deverá efetuar dois tipos de serviço de entrega, o direto ao cliente e o que fornece o cliente via entreposto. Deste modo, como a empresa tenciona reduzir os custos relacionados com o transporte de produto acabado, deverá ser fácil tomar decisões sobre quais as encomendas que deverão ser efetuadas com entrega direta ao cliente, bem como, através do entreposto.

Com o uso de um modelo matemático exato para o roteamento da frota subcontratada, não há uma divisão lógica das encomendas a efetuar por cada um dos serviços e, todas serão alocadas em veículos para entrega direta de maneira a diminuir a distância a percorrer pelos veículos. Deste modo, a única comparação possível para a decisão final do roteamento é comparar o custo de cada veículo recorrendo a cada um dos serviços possíveis, uma vez que não há presentemente sensibilidade sobre quais as encomendas que deveriam ser encaminhadas para cada um dos serviços.

Desta forma, para que as rotas criadas representem de uma melhor forma o modelo de negócio e as zonas de ação da empresa e, por fim, que facilitem a tomada de decisão do responsável, justifica-se a introdução de um método de *clustering* para a definição dos subproblemas a resolver.

Deste modo, construir e utilizar um método de *clustering* baseado nas características dos dois serviços deste tipo de frota, permite uma divisão lógica das encomendas que deverão ser efetuadas pela frota subcontratada com entrega direta e aquelas que deverão ser efetuadas através do entreposto. Permite evidenciar as zonas de ação da empresa repartindo, logicamente, as encomendas por zonas geográficas que, apenas com recurso ao número de veículos necessários, satisfazem a procura de todos os clientes. Por fim, o método irá também permitir uma melhor, e mais fácil, decisão ao responsável do transporte tendo em vista a minimização de custos.

No entanto, para uma melhor compreensão do método de *clustering* criado para a frota subcontratada, e uma vez que o mesmo se baseia nos custos praticados pelos

dois tipos de serviço desta frota, é necessário compreender os custos de transporte que são praticados atualmente. Assim sendo, no seguimento deste subcapítulo são apresentados os custos de transporte representativos da empresa, e para além da caracterização dos serviços da frota subcontratada são também referidos os custos relativos à frota própria.

3.2.1 CUSTOS DO SERVIÇO DE TRANSPORTE

Sendo esta uma ferramenta de roteamento, deverá sempre minimizar a distância a percorrer pelos veículos para minimizar os custos totais relativos ao transporte de produto acabado da empresa. Deste modo, deverá sempre haver um custo atribuído a todos os serviços existentes para que seja possível saber um custo aproximado que cada rota terá e, desta forma, o custo aproximado diário relativamente ao transporte.

Devido a esta necessidade, foi calculado um custo por cada quilómetro percorrido que fosse considerado adequado para a frota própria da empresa. Devido à existência de dois tipos de viatura, um camião de pequenas dimensões e dois furgões, este custo por quilómetro foi obtido através do somatório de todas as despesas apresentadas no primeiro trimestre do ano civil de 2017, a dividir pelo total de quilómetros efetuados no mesmo período, para cada tipo de viatura existente. No que diz respeito às despesas da frota própria, estão incluídos os seguintes gastos: combustível, reparações de veículos e, também custos variados, que se referem a salários dos motoristas e ajudantes, seguros de veículos e contratos de telefone para comunicações com a empresa e clientes.

Além do custo por quilómetro para cada género de viatura, foi também calculado o custo por quilograma para toda a frota própria, pois é a unidade de medida de referência para a empresa e, é calculado através do somatório de custos da frota própria a dividir pelo total de quilogramas transportados, apenas durante o primeiro trimestre de 2017.

No que diz respeito ao roteamento da frota própria, visto ser heterogénea deverão ser utilizados custos diferentes para cada tipo de veículo. Assim, será utilizado um valor de custo de 1,24 € por cada quilómetro percorrido para o veículo pesado e 1,14 € para cada um dos furgões.

Apenas a título de referência, pois não influencia a ferramenta de roteamento, a frota própria apresenta um custo por quilograma transportado de aproximadamente 0,14 €. Os custos calculados para a frota própria, assim como todos os valores utilizados, podem ser confirmados na Tabela 5.

Tabela 5 - Custo por quilómetro e por quilograma calculados para cada género de veículo da frota própria

	Camião 13,5 toneladas	Furgões	Total frota
Quilómetros efetuados	9211	17550	26761
Quilogramas transportados	161939	66363	228302
Custo de combustível [€]	2765,12	2823,28	5498,40
Custo de manutenção [€]	235,04	17,00	252,04
Custos variados [€]	8544,16	17088,33	25632,49
Somatório de custos [€]	11454,32	19928,61	31382,93
Custo por quilómetro [€/km]	1,24	1,14	1,17
Custo por quilograma [€/kg]	0,07	0,30	0,14

Já relativamente à frota subcontratada, tanto para o serviço de transporte direto como o serviço via entreposto, os valores foram previamente negociados pela empresa. Deste modo, para o transporte direto será utilizado um valor de referência de 0,90 € por cada quilómetro percorrido pelo veículo subcontratado e, para o serviço via entreposto será utilizado o valor de 0,09 € por cada quilograma transportado.

Para o serviço de transporte direto foi utilizado a medida custo por quilómetro e, sendo que o transporte direto de mercadoria poderá ou não ser efetuado pela mesma empresa que efetua o transporte via entreposto, o valor de custo por quilómetro poderá variar após ser definida a empresa subcontratada, no entanto, o valor fornecido é um valor de referência para algumas empresas de logística consultadas.

Já relativamente ao custo do transporte via entreposto, o serviço atual é cobrado por cada recolha de mercadoria e, em seguida é aplicada uma taxa que está dependente do peso de encomenda, assim como, o local de entrega. Deste modo, será utilizado o valor de 0,09 € por quilograma, que é uma aproximação obtida, relativa ao primeiro trimestre do ano de 2017, após ser feita uma divisão do custo total do transporte subcontratado do modelo atual pelo total de quilogramas transportados pelo mesmo serviço. Assim, como a empresa utiliza o custo por quilograma como medida de referência para avaliar se o custo de transporte mensal é elevado ou não e, visto não ser necessário qualquer planeamento de rotas para este serviço, será sempre utilizado este valor até ordem contrária, uma vez que este valor influencia a repartição do problema demonstrada no subcapítulo dedicado ao *clustering* deste tipo de frota.

3.3 CLUSTERING PARA A FROTA SUBCONTRATADA

Uma estratégia de divisão para a frota subcontratada, deverá ser capaz de representar o modelo de negócio da empresa, evidenciando as zonas de ação da empresa e dividindo de uma forma lógica as entregas que deverão ser efetuadas diretamente ao cliente e, aquelas que deverão ser feitas via entreposto.

Esta abordagem aproximada, foi desenvolvida em conjunto com o departamento logístico da empresa, e permite dividir, de uma forma logica, as entregas a efetuar de modo a que os objetivos propostos sejam atingidos.

Uma vez que o objetivo será sempre minimizar os custos relacionados com o transporte, é necessária uma comparação entre os custos dos dois tipos de serviço que irá confirmar em que condições é mais vantajoso o uso do transporte direto ou do transporte via entreposto.

Assim sendo, sabendo que o custo do transporte direto é cobrado ao quilómetro percorrido e está dependente apenas da distância a percorrer para realizar a entrega, será de esperar que para grandes encomendas o transporte direto compense em relação ao custo via entreposto, que é cobrado ao quilograma.

Para uma melhor comparação entre os dois custos, visível na Figura 10, foi testado para uma entrega com uma distância de 315 km (distância correspondente ao trajeto Porto – Lisboa) a evolução do custo por quilograma transportado com o aumento dos quilogramas de produto acabado a entregar. A comparação dos dois custos será feita em custo por quilograma, visto esta ser a unidade de referência que a empresa utiliza.

Comparação do Custo por quilograma para os serviços de transporte subcontratados

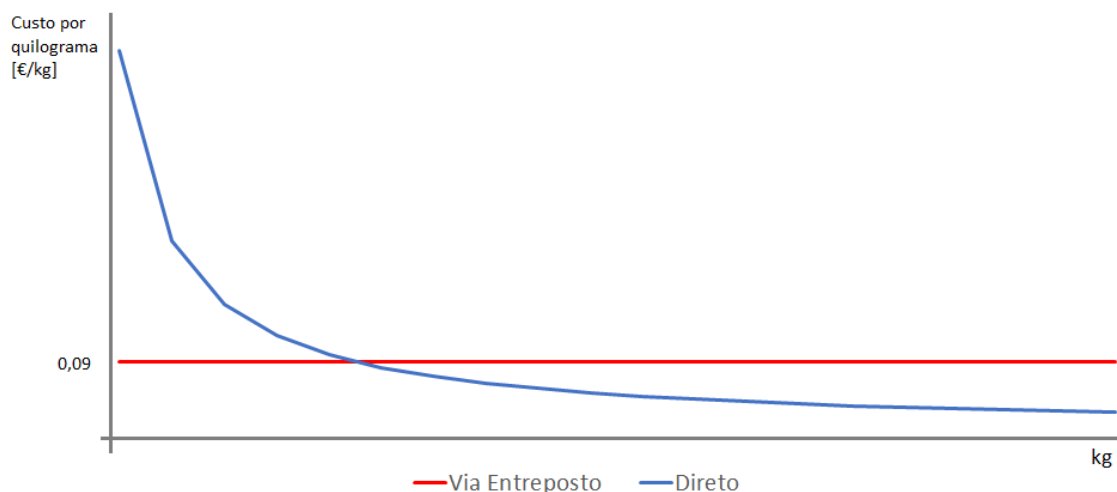


Figura 10 - Gráfico de comparação entre os custos por quilograma dos serviços subcontratados

Deste modo, para ser possível encontrar as condições que favorecem o uso do transporte direto relativo ao transporte via entreposto, representado na Figura 10 após a interseção dos dois custos, será necessário comparar matematicamente o custo por quilograma do serviço de transporte direto com o custo por quilograma do transporte via entreposto.

Assim, para ser compensatório o recurso a transporte direto para efetuar entregas, o custo por quilograma deste serviço deverá ser inferior ou, no pior dos casos igual, ao custo por quilograma do serviço via entreposto, isto é, 0,09 € por cada quilograma.

$$\frac{0,90 * km}{kg} \leq 0,09 \Leftrightarrow \frac{km}{kg} \leq 0,1 \quad (3.1)$$

Deste modo, com os valores de custos fornecidos, como é possível observar na equação (3.1), é então vantajoso efetuar entregas diretas caso os quilómetros a percorrer sejam inferiores, no máximo iguais, a 10% do peso da encomenda efetuada. Com isto, deverá ser calculado o rácio de entrega, através da fórmula (3.2) em que o índice i representa o nó de origem e o índice j representa o nó de destino de um arco, e caso o rácio respeite a condição de ser inferior ou igual 0,1 é possível afirmar que do nó i até ao nó j é vantajoso entregar mercadoria diretamente.

$$\text{Rácio de entrega}_{ij} = \frac{\text{distância}_{ij}}{\text{procura em quilogramas}_j} \quad (3.2)$$

Seguindo este rácio de entrega, foram criados alguns métodos de repartição para dividir de uma forma lógica as entregas subcontratadas de abastecimento direto ao cliente das encomendas com serviço via entreposto, no entanto, nem todos se tornaram em soluções viáveis.

Numa das tentativas para o método de *clustering*, na primeira etapa era efetuada uma enumeração de todas as combinações possíveis de trajetos envolvendo o depósito e todos os clientes a abastecer, calculando os respetivos rácios de entrega. Em seguida, para iniciar o *cluster* era escolhido o cliente cujo rácio de entrega com origem no depósito da empresa fosse o mais baixo e respeitasse a condição, ficando este na primeira posição. Em seguida, com origem nesse cliente, eram adicionados todos os clientes cujo rácio de entrega fosse inferior a 10%. Este passo era repetido para todos os clientes presentes no *cluster* até não haverem outros cuja condição para o rácio de entrega se verificasse. Um *cluster* seguinte era iniciado com o cliente que ainda não estivesse atribuído a nenhum grupo de clientes, e que o rácio de entrega fosse mais baixo com origem no depósito da fábrica. Quando não existissem rácios de entrega que verificassem a condição, os clientes que não estivessem atribuídos a nenhum *cluster*, eram agrupados num *cluster* final.

No entanto, uma vez que o rácio de entrega depende da distância e do peso de encomenda, esta situação originava *clusters* de grandes dimensões com clientes pertencentes a várias zonas de ação da empresa devido à elevada quantidade de produto a entregar em cada um dos clientes.

Para evitar a inclusão de clientes de diferentes zonas de ação da empresa no mesmo *cluster*, dividindo assim de uma melhor forma as entregas a efetuar por cada um dos serviços disponíveis, seria necessário definir um limite de distância. Em conjunto com o departamento logístico, ficou decidido que, um veículo não deveria percorrer mais de 100 km sem abastecer um cliente, no entanto, para trajetos em que a origem é o depósito da empresa este limite de distância não se aplica.

Deste modo, num segundo método, o *cluster* inicia-se com o cliente de rácio mais baixo desde a empresa e, em seguida, com origem nesse cliente são verificados e adicionados ao *cluster* todos os clientes cujo rácio de entrega seja inferior a 10% e a distância a percorrer seja inferior a 100 km. O processo deveria ser repetido até serem verificados todos os clientes presentes no grupo criado. Um outro *cluster* era iniciado com o cliente que ainda não estivesse atribuído, e que o rácio de entrega fosse mais baixo com origem no depósito da fábrica. O método terminava ao agrupar num só *cluster* todos os clientes que não tivessem nenhum rácio de entrega que respeitasse a condição definida.

Apesar de dividir de uma melhor forma as zonas de ação da empresa, foi perceptível que com este método, alguns clientes vizinhos eram alocados a *clusters* diferentes devido às diferenças de quantidade a entregar em cada um deles.

Foi então desenvolvido um terceiro e último método de repartição que, de forma a evitar que clientes vizinhos e que devam ser fornecidos pelo mesmo tipo de frota sejam colocados em *clusters* diferentes, os clientes serão inicialmente agrupados por cidades e, em seguida, serão calculados os rácios de entrega relativamente ao serviço a efetuar em cada cidade. Assim sendo, no cálculo do rácio a procura em quilogramas corresponde à soma de quilogramas a entregar na cidade, enquanto que, a distância corresponde à distância total para chegar à cidade j . A Tabela 6, descreve os passos para o método de repartição desenvolvido.

Tabela 6 - Etapas presentes no método de *clustering* desenvolvido

Etapa	Descrição
1	Agrupar os clientes por cidades de entrega;
2	Enumerar todas as combinações possíveis de trajetos envolvendo o depósito e todas as cidades a abastecer, calculando todos os rácios de entrega;
	Realizar somente o primeiro passo a ser verificado, respeitando a ordem:
3	<ul style="list-style-type: none"> a) Se existirem rácios de entrega inferiores a 10% com origem no depósito, iniciar o <i>cluster</i> com o mais baixo colocando a cidade na posição 1 do <i>cluster</i>; b) Caso não existam rácios de entrega inferiores a 10% com origem no depósito, mas existirem entre duas cidades distanciadas a menos de 100 km, escolher o menor rácio de entrega colocando a cidade origem na posição 1 do <i>cluster</i> e a cidade destino na posição 2; c) Se não existem rácios de entrega inferiores a 10%, inserir as cidades não atribuídas a um só <i>cluster</i>;
4	Com origem na cidade da posição 1 do <i>cluster</i> , verificar e acrescentar ao grupo todas as cidades que respeitem a condição do rácio e de distância inferior a 100 km, colocando-as nas posições seguintes da lista no <i>cluster</i> ;

-
- 5 Avançar para a cidade na posição seguinte do *cluster* e com origem nessa cidade, verificar e acrescentar ao *cluster* todas as cidades que respeitem a condição do rácio de entrega e de distância inferior a 100 km nas posições seguintes do *cluster*;
- Repetir até que sejam verificadas todas as cidades do *cluster* e não existam mais cidades a acrescentar;
-
- 6 Voltar para a etapa 3, até que todas as cidades sejam atribuídas a um *cluster*.
-

A cidade escolhida para iniciar um *cluster* deverá ser aquela em que o rácio de entrega seja mais baixo e respeite a condição de 10% com origem na empresa, uma vez que indica a cidade que é mais vantajosa de visitar diretamente. Caso não existam rácios de entrega menores que 10% com origem no depósito da empresa, deverá ser escolhida a cidade origem com o menor rácio de entrega, e que respeite a condição de rácio e distância, entre duas cidades a abastecer. Esta decisão foi tomada, pois poderá não ser vantajoso visitar determinada cidade diretamente, no entanto, um grupo de cidades com ligações entre si já poderá justificar o serviço de entrega direto. Quando não forem verificados quaisquer rácios de entrega que respeitem a condição de 10%, quer seja com origem na fábrica ou em qualquer outra cidade, deverá ser criado um *cluster* com as cidades não atribuídas, pois significa que aquelas entregas não justificam um serviço de entrega direta de qualquer forma.

Uma vez escolhida a primeira cidade de um *cluster*, com origem nessa cidade deverão ser adicionadas todas as outras cidades cuja condição do rácio de entrega e de distância limite seja verificada. Poderia ser apenas escolhida a cidade cujo rácio de entrega fosse mais baixo, porém, iriam ser criados muitos mais *clusters* e todos eles com poucos clientes, pois seriam descartadas muitas cidades cujo serviço direto seria vantajoso.

A Figura 11, considera um exemplo de repartição de um conjunto de cidades, considerando que seria sempre escolhido para ser adicionada ao *cluster*, a cidade que tivesse o rácio de entrega mais baixo relativamente à cidade de origem. Considere-se então o conjunto de pontos da alínea a) da Figura 11, onde o ponto circular vermelho significa o depósito e os pontos quadrados representam todas as cidades a visitar. Quando um dos pontos está a linha verde, significa que é o ponto considerado como origem, enquanto que, os pontos a linha vermelha representam as cidades alvo para serem adicionadas ao *cluster*, pois as condições impostas, seja de rácios ou de distância apenas entre cidades, são verificadas. Os pontos preenchidos a cor azul representam cidades escolhidas para pertencer ao *cluster* e, a branco os pontos não atribuídos.

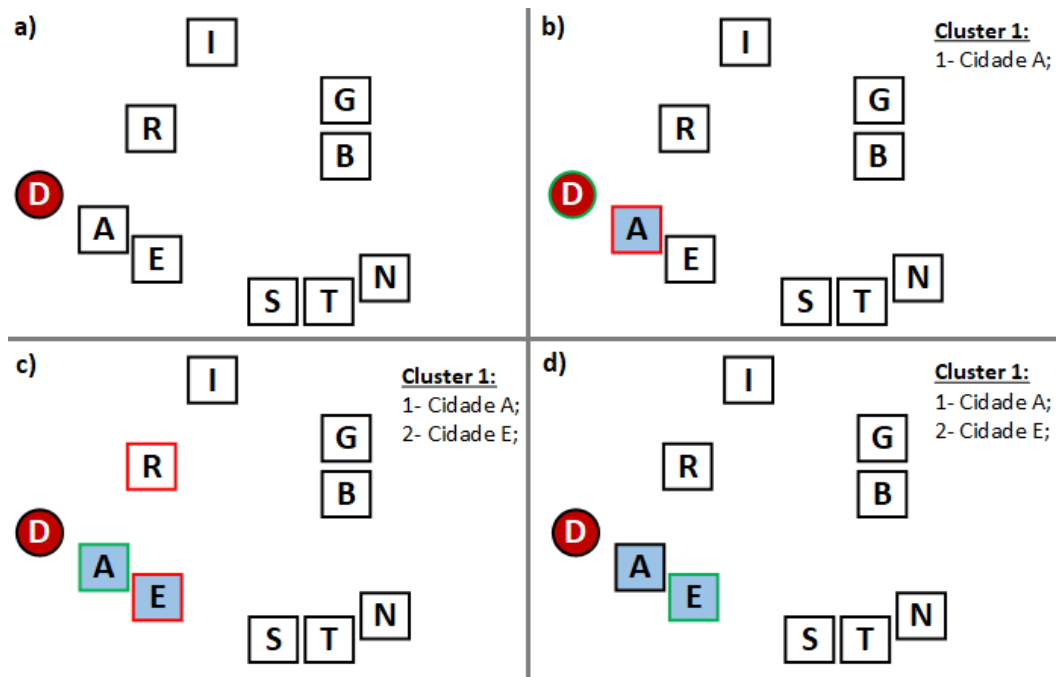


Figura 11 - Exemplo de *clustering* caso fosse escolhido o rácio mais baixo apenas

Como é possível verificar na alínea b) da Figura 11, a cidade escolhida para iniciar o *cluster* é a cidade A, pois é a única no conjunto inicial que tem um rácio de entrega inferior a 10% com origem no depósito. Em seguida, na alínea c), apesar de a cidade A ter como alvo as cidades E e R, escolhendo apenas a cidade com rácio mais baixo relativamente à origem é adicionada ao *cluster* a cidade E. Na alínea d), a origem é considerada como sendo a cidade E e, uma vez que não existem cidades cujo rácio de entrega seja verificado, o *cluster* termina apenas com as cidades A e E.

Considere-se agora, na Figura 12, uma repartição dos mesmos pontos da alínea a) da Figura 11, através do método de *clustering* criado.

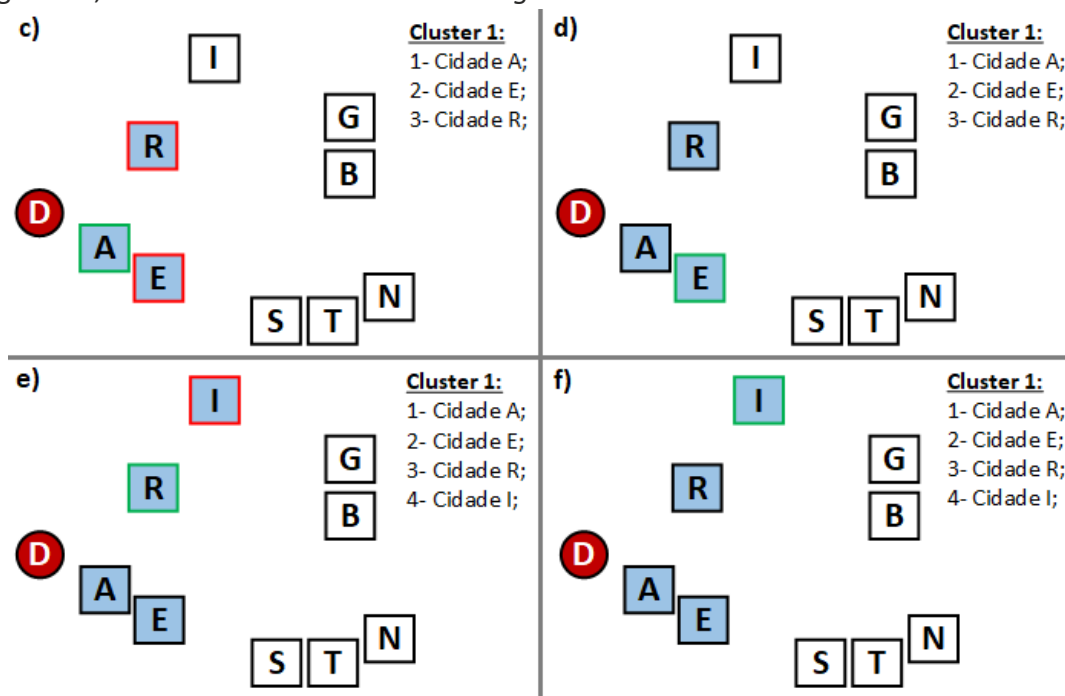


Figura 12 - Exemplo de *clustering* caso fossem escolhidas todas as cidades alvo

Considerando que as alíneas a) e b) da Figura 11, se verificam para a Figura 12, isto é, o mesmo conjunto de pontos a repartir e, a cidade escolhida para iniciar o *cluster* é a cidade A. Na alínea c) da Figura 12, é possível verificar que a cidade A possui os clientes E e R como alvos e, são as duas adicionadas ao *cluster* criado resultando um grupo com as cidades A, E e R. A alínea d), como já tinha sido verificado, verifica-se que com origem na cidade B, não existe nenhuma cidade alvo e, então não serão adicionadas novas cidades ao *cluster*. Em seguida, na alínea e), já com origem na cidade R, verifica-se que existe como alvo a cidade I, adicionando-a devidamente ao conjunto criado. Por fim, na alínea f), com origem na cidade I, não existindo nenhuma cidade alvo para ser adicionada, é terminado o primeiro *cluster* com as cidades A, E, R e I.

De acordo com os dados já descritos, a Figura 13, apresenta a repartição do conjunto inicial de entidades do exemplo abordado tendo em conta os dois métodos, considerando apenas o rácio de entrega mais baixo na alínea a) e, na alínea b) a repartição obtida através do método desenvolvido e aplicado na ferramenta desenvolvida para resolver o problema da empresa.

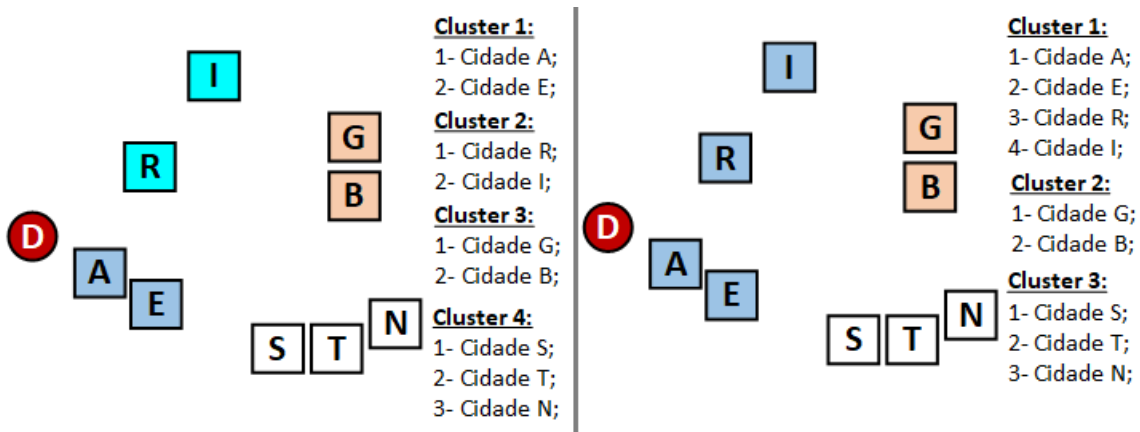


Figura 13 - Repartição do conjunto de entidades de acordo com as duas possibilidades

Como é possível verificar, o método desenvolvido cria um menor número de *clusters* com um maior número de cidades a fornecer e, caso as quantidades a serem entregues o permitam, o método desenvolvido consegue uma distribuição utilizando um menor número de veículos relativamente ao método da alínea a).

Assim sendo, o rácio de entrega serve apenas para relacionar as cidades entre si, agrupando as mais vantajosas a fornecer diretamente dependendo da localização de um veículo, ficando sempre o roteamento do *cluster* ao cargo de um método de solução exata para problemas *VRP*.

Deste modo, a ordem pela qual o *cluster* é criado, neste exemplo A-E-R-I, não significa que seja a ordem que minimiza as distâncias a percorrer e, conseqüentemente, minimiza os custos de transporte direto. Significa sim, que existe uma relação entre este conjunto de cidades, que indicam que poderá ser vantajoso efetuar uma entrega com serviço direto ao cliente.

A Figura 14, apresenta o fluxograma relativo ao método de *clustering* desenvolvido para uma mais fácil compreensão.

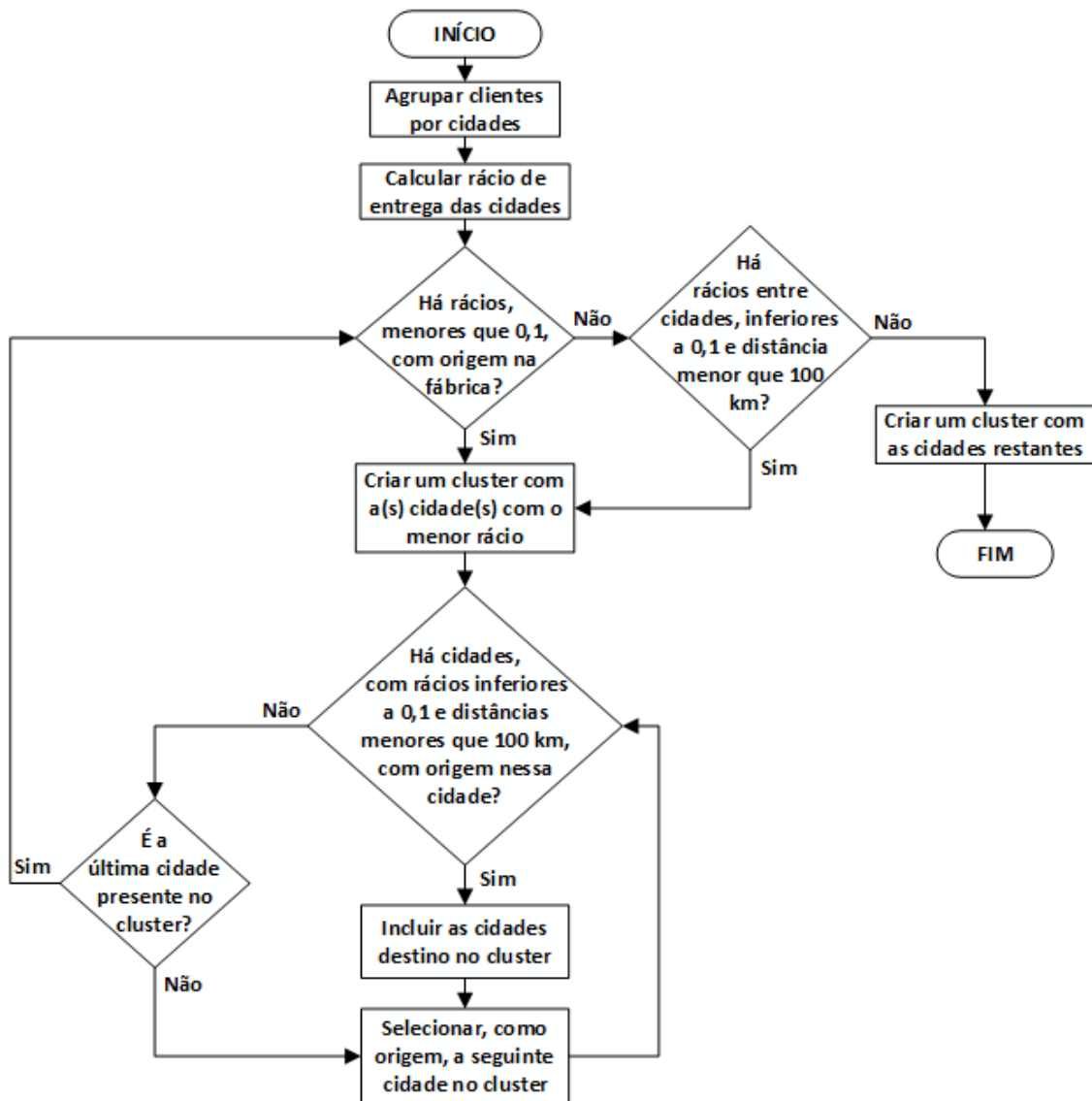


Figura 14 - Fluxograma do método de *clustering* usado

3.4 ABORDAGENS AOS PROBLEMAS E MODELO MATEMÁTICO

Como tem sido abordado ao longo deste trabalho, o roteamento da distribuição de produto acabado da empresa está dividido em dois subproblemas: o roteamento da frota própria da empresa e roteamento de frota subcontratada.

No que diz respeito à frota própria, a abordagem ao problema é muito linear. Uma vez que os veículos da empresa possuem um raio de ação bastante reduzido e abastecem um conjunto de clientes específicos e com características semelhantes, não será necessário o uso de qualquer método de *clustering*. Deste modo, as soluções para o roteamento deste tipo de frota são obtidas através de um modelo matemático de programação inteira linear que obtém soluções exatas e que minimizam os custos de transporte.

Já relativamente à frota subcontratada, uma vez que possui um conjunto de clientes heterogéneo, com um raio de ação elevado e existe a possibilidade de a distribuição de produto acabado ser efetuada por dois tipos de serviço, cujo custo é distinto e ambos os serviços são favoráveis para situações diferentes, o roteamento será obtido através de um procedimento de duas fases.

Na primeira fase, é introduzido um método de *clustering*, apresentado no subcapítulo 3.3, para representar de uma melhor forma o modelo de negócio da empresa, mas também para dividir e dar uma maior sensibilidade ao decisor sobre quais as entregas deverão ser efetuadas com recurso ao serviço direto e com recurso ao serviço via entreposto. Numa segunda fase, é efetuado um roteamento de veículos para cada *cluster*, através do mesmo modelo matemático de programação inteira linear utilizado para a frota própria, que fornece as soluções exatas que minimizam os custos de transporte.

Alguns métodos de duas fases para o roteamento de veículos, como os que foram descritos no subcapítulo 2.2 referente ao clustering, foram já estudados apresentando bons resultados. Destacam-se também os métodos desenvolvidos por Ruiz, Maroto, and Alcaraz (2004) e Kim, Kim, and Sahoo (2006), que foram criados tendo em conta o modelo de negócio das respetivas empresas e, aplicados para resolverem problemas de roteamento reais.

Para o roteamento da frota própria, serão sempre utilizados os mesmos três veículos que são propriedade da empresa, e por essa razão o problema caracteriza-se por ser um típico problema de roteamento de veículos, mais conhecido como *VRP*. No entanto, para a frota subcontratada, como o roteamento será efetuado para cada *cluster* criado, deverão ser utilizados o menor número possível de veículos suficientes para abastecer a procura de todos os clientes incluídos no *cluster*.

Poderá acontecer a situação em que, para um determinado grupo de clientes a abastecer, será apenas necessário utilizar um único veículo no roteamento. Neste caso, o problema a resolver será sim um *TSP* e não um *VRP*, porém, a formulação matemática para um problema *VRP* será sempre capaz de resolver problemas *TSP*, no entanto, uma formulação *TSP* não seria capaz de resolver um problema *VRP*.

De um modo formal, cada problema de roteamento da empresa passa por escalonar n clientes, que são independentes, pertencentes ao conjunto $C = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ em m veículos paralelos que pertencem ao conjunto $V = \{1, 2, 3, \dots, m\}$. Além destes conjuntos, existe ainda um depósito inicial que será representado por dois índices: 0 que representará o Depósito Inicial (a fábrica produtiva) e, assim, o início de uma rota e, $n+1$ que representa um Depósito que assinala o fim de uma rota.

É importante assinalar que, no caso de o roteamento ser efetuado para a frota própria da empresa, o Depósito assinalado por $n+1$ representa também a fábrica produtiva uma vez que os veículos devem sempre voltar à empresa. Já no caso de o roteamento ser efetuado para a frota subcontratada, uma vez que, a partir do momento que tenham sido fornecidos todos os clientes incluídos numa rota, o veículo deixa de estar

ao encargo da empresa, o Depósito $n+1$ será então um depósito fictício que assinala o fim de uma rota.

Esta situação está representada na Figura 15, onde estão representados a preto os clientes a fornecer, a vermelho o depósito fictício e, a azul o trajeto entre o último cliente a ser fornecido e o depósito fictício. Este último trajeto, não tem distância nem custos associados e, basicamente coincide com a localização do último cliente da rota, uma vez que após este ser servido o serviço de transporte fica completo.

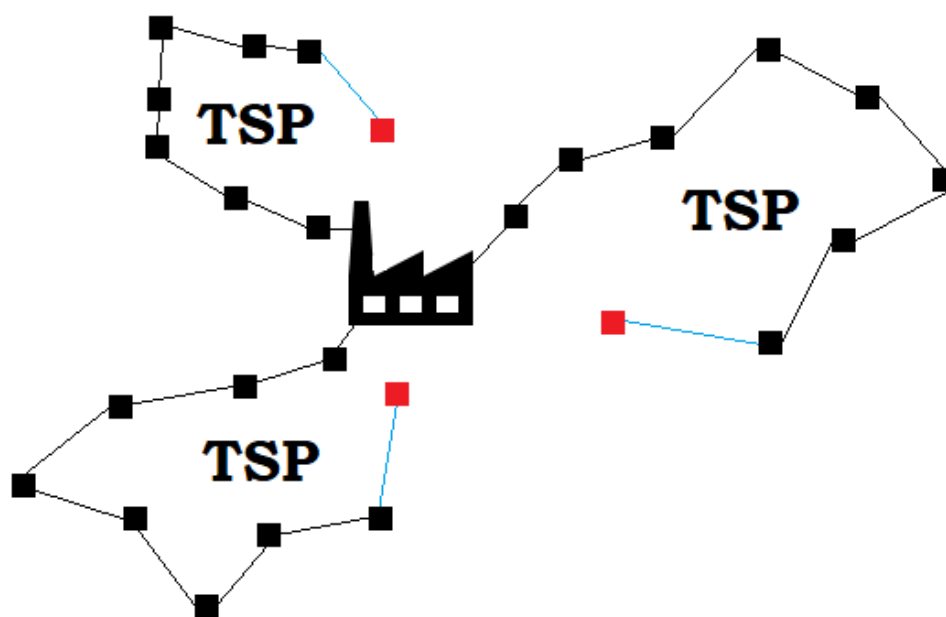


Figura 15 - Depósito final fictício para a frota subcontratada

Para uma melhor compreensão do modelo matemático desenvolvido o cálculo de soluções para os problemas de roteamento que a empresa apresenta, na Tabela 7 são apresentados todos os parâmetros utilizados para a sua formulação.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados e necessários ao modelo matemático

Parâmetro	Descrição
c_k	Custo por quilómetro percorrido, relativo ao veículo de índice k utilizado
d_{ij}	Distância, em quilómetros, que será percorrida no arco com origem em i e destino j
pkg_j	Procura de produto acabado, em quilogramas, que deverá ser entregue no cliente de índice j
pp_j	Procura de produto acabado, em paletes, que deverá ser entregue no cliente de índice j
qkg_k	Capacidade, em quilogramas, que o veículo de índice k possui
qp_k	Capacidade, em paletes, que o veículo de índice k possui
M	Constante de alto valor que garante a veracidade de restrições

Além de parâmetros apresentados, o modelo matemático depende das suas variáveis de decisão. Assim, sendo os índices $i \in C \cup \{0\}$, $j \in C \cup \{n+1\}$, e $k \in V$, em que i e j deverão ser sempre diferentes, o modelo apresenta as seguintes variáveis de decisão:

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{se há fluxo no arco de origem } i \text{ e destino } j, \text{ usando o veículo } k \\ 0, & \text{se não há fluxo no arco de origem } i \text{ e de destino } j, \text{ usando o veículo } k \end{cases}$$

$$w_j^k = \text{Distância percorrida pelo veículo } k \text{ para chegar ao nó de índice } j,$$

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

Desta forma, o modelo matemático visa minimizar os custos de transporte e, visto os custos serem uma constante para cada tipo de frota, o objetivo de minimizar os custos de transporte está diretamente ligado a minimizar a distância a percorrer pelos veículos.

Assim, apresentando inicialmente a função objetivo (F.O.), seguido das restrições a que está sujeito, o modelo matemático desenvolvido é o seguinte:

$$(F.O.) \quad \text{minimizar } CT = \sum_{k \in V} \sum_{i \in C \cup \{0\}} \sum_{j \in C \cup \{n+1\}} c_k * d_{ij} * x_{ij}^k \quad (3.3)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in C \cup \{0\} | i \neq j} x_{ij}^k = 1, \forall j \in C \quad (3.4)$$

$$M * \sum_{j \in C} x_{0j}^k \geq \sum_{i \in C \cup \{0\} | i \neq j} x_{ij}^k, \forall k \in V \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \in C} x_{0j}^k \leq 1, \forall k \in V \quad (3.6)$$

$$\sum_{i \in C \cup \{0\} | i \neq j} x_{ij}^k = \sum_{h \in C \cup \{n+1\} | j \neq h} x_{jh}^k, \forall j \in C, \forall k \in V \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in C \cup \{0\} | i \neq j} \sum_{j \in C | i \neq j} pp_j * x_{ij}^k \leq qp_k, \forall k \in V \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in C \cup \{0\}} \sum_{j \in C} pkg_j * x_{ij}^k \leq qkg_k, \forall k \in V \quad (3.9)$$

$$\sum_{i \in C \cup \{0\} | i \neq j} \sum_{j \in C \cup \{n+1\} | i \neq j} d_{ij} * x_{ij}^k \leq 225, \forall k \in V \quad (3.10)$$

$$(w_i^k + d_{ij}) - M(1 - x_{ij}^k) \leq w_j^k, \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (3.11)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \forall i \in C \cup \{0\}, \forall j \in C \cup \{n+1\}, \forall k \in V \quad (3.12)$$

Este modelo matemático, assegura através da equação (3.3), função objetivo do modelo criado, que os custos de transporte serão minimizados.

A primeira restrição (3.4), assegura que todos os clientes presentes no modelo deverão ser fornecidos exatamente uma vez, qualquer que seja o veículo utilizado e o cliente precedente. A segunda restrição, equação (3.5) garante que, cada vez que um veículo deva fornecer algum cliente, o mesmo deverá sair do depósito inicial, isto é, da fábrica. A restrição (3.6) é usada para garantir que um veículo não pode sair da fábrica produtiva em direção a mais que um cliente. Já a quarta restrição, equação (3.7), designada por restrição de conservação de fluxo, assegura a continuidade de fluxo de um veículo, garantindo assim que, quando um veículo chega a determinado nó de índice j , o mesmo tem que sair de lá em direção a outro nó.

A quinta e sexta restrições, sendo a primeira delas, equação (3.8), relativa a paletes e a equação (3.9) relativa a quilogramas, são usadas para garantir que o somatório das quantidades de mercadoria a entregar pelo veículo índice k deverão ser inferiores, e no máximo iguais, à capacidade do veículo.

A restrição (3.10) garante que a distância máxima a percorrer por um veículo numa rota, não deverá ser superior a 225 km. No entanto, esta restrição apenas se aplica à frota própria. Uma vez que não existem tempos de referência para os serviços de entrega, os veículos da frota própria estão limitados por uma distância, que se assume como a capacidade máxima para um dia de trabalho, de 225 km. Já a frota subcontratada, uma vez que o método de *clustering* permite uma divisão por zonas de ação da empresa, cada veículo terá uma zona específica de operação e, por essa razão, o limite de distância será desnecessário.

A equação (3.11), é uma restrição *MTZ* que evita a criação de subpercurso e permite um encadeamento para todos os clientes envolvidos numa rota. Usualmente a restrição *MTZ* aplica-se a problemas com janelas de entrega, utilizando o tempo de serviço e de deslocação, em vez de ser utilizada a distância como acontece neste caso. Assim sendo, não sendo considerados tempos, esta restrição traduz-se basicamente como um contador de quilómetros para atingir o cliente de índice j .

Por fim, a última restrição, equação (3.12), obriga a que o valor da variável de decisão x_{ij}^k que atribui o fluxo aos arcos seja binário, isto é, zero ou um.

Apesar das diferentes abordagens para a frota própria e frota subcontratada, o modelo de programação inteira linear para a obtenção de soluções exatas de roteamento será o mesmo para as duas frotas disponíveis, apenas como foi referido, relativamente à frota subcontratada a restrição (3.10) não será incluída.

IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS

- 4.1 BASE DE DADOS DE CLIENTES
- 4.2 BASE DE DADOS DE VEÍCULOS
- 4.3 BASE DE DADOS DE DISTÂNCIAS
- 4.4 RESULTADOS OBTIDOS

4 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS

Sendo a centralização da gestão do transporte da empresa no departamento logístico um dos objetivos prioritários, é necessária a criação de uma ferramenta de roteamento que irá permitir que seja um responsável da empresa a controlar como será efetuada a distribuição de produto acabado, e não empresas subcontratadas.

Assim, de forma a combater as deficiências apresentadas atualmente na distribuição, bem como, satisfazer todos os objetivos do departamento, a ferramenta deverá apresentar algumas características, assim: a ferramenta terá que ser capaz de efetuar um roteamento para as entregas a clientes destinados aos veículos próprios da empresa, bem como, para as entregas destinadas a frota subcontratada; deverá poder ser usada de forma contínua, independentemente de serem acrescentados ou retirados veículos da frota própria; e deverá permitir que sejam acrescentados clientes.

De forma a possibilitar um uso contínuo do modelo matemático para o roteamento por pessoas sem formação académica nestes conteúdos, foi desenvolvido um ficheiro de interface em *Microsoft Excel*, que funciona através de macros devidamente programadas.

Com a criação desta ferramenta, pretende-se que a atividade de roteamento seja simples e rápida para o operador, pois não será necessário enumerar todas as combinações de trajetos e valores envolvidos como distâncias, procuras e custos, mas também não será necessário inserir manualmente todas as restrições do modelo matemático.

Deste modo, a ferramenta foi criada na plataforma *Microsoft Excel* por este ser um software de uso muito intuitivo e, simultaneamente muito utilizado pelos operadores da empresa para efeitos de controlo e gestão (apesar de a empresa ter o software *SAP* instalado). Assim sendo, a ferramenta de roteamento deve ser o mais simples possível, apresentar um design limpo e apresentar o menor número de botões possíveis, todos eles com fácil compreensão da funcionalidade atribuída. Uma análise mais detalhada ao ficheiro explicativo para o utilizador desenvolvido para a empresa pode ser encontrada no ANEXO A.

Paralelamente, para o funcionamento da ferramenta de apoio à decisão de roteamento, são necessárias bases de dados como por exemplo de distâncias e veículos que irão integrar os modelos matemáticos criados. Além destas, será necessária uma base de dados de clientes que servirá para encaminhar clientes para um dos dois subproblemas de roteamento existentes, referentes à frota própria e à frota subcontratada.

Assim, no decorrer deste subcapítulo, serão apresentadas todas as bases de dados criadas, que estão embebidas no ficheiro desenvolvido e, são essenciais ao funcionamento desta ferramenta de roteamento.

4.1 BASE DE DADOS DE CLIENTES

A base de dados de clientes, poderá ser utilizada para uma simples consulta dos dados de um cliente, mas sobretudo deverá ser usada para dividir os clientes entre o roteamento da frota própria, como da frota subcontratada.

Nesta base de dados estão presentes informações como: número de identificação no sistema de gestão *SAP*, o nome da empresa respetiva, informações de localização e, por fim, tipo de frota que deverá ser utilizado para efetuar a entrega.

Nas informações de localização estão presentes os seguintes dados: código postal, cidade e país de entrega. A inclusão destes dados é essencial para o bom funcionamento da ferramenta, uma vez que, caso as entregas sejam para exportação ou para entregar nas ilhas, toda a mercadoria será depositada num entreposto de uma outra empresa subcontratada que se encarrega de efetuar este tipo de entregas. Deste modo, como estas encomendas serão para entregar num só ponto, basicamente, haverá apenas uma entrega a fazer, mas que pertence a vários clientes. Assim, com o funcionamento da ferramenta será criado um cliente virtual chamado *EXP_ILHAS* que irá agrupar numa só entrega todos os clientes cujas entregas serão para efetuar em território exterior a Portugal Continental.

Um dos objetivos do departamento logístico é também que, com o uso de uma ferramenta de roteamento e restringindo as funções dos motoristas à entrega de produto acabado, a frota própria da empresa consiga abastecer diariamente um número maior de clientes do que aqueles que abastece atualmente.

Assim, após um mapeamento da localização dos clientes que a empresa fornece, considerando devidamente o volume médio e o número de entregas que o histórico da empresa apresenta, a base de dados de clientes criada apresenta todos os clientes que deverão ser fornecidos pela frota própria. Esta nova base de clientes apresenta agora diversos clientes que, até hoje, salvo raras exceções foram sempre fornecidos por veículos subcontratados.

No caso de ao efetuar um roteamento para a frota própria, nem todos os clientes conseguirem ser servidos, isto é, a capacidade de os veículos não permitir efetuar entregas a todos os clientes, estes serão automaticamente fornecidos pelas entregas subcontratadas via entreposto e, não entrarão no roteamento de entregas subcontratadas diretas.

4.2 BASE DE DADOS DE VEÍCULOS

Assim como a base de dados de clientes, a base de dados de veículos além de ser usada para informação e consulta, serve para definir o conjunto de veículos da frota própria irão entrar no roteamento, assim como, para definir as limitações de capacidade que cada veículo possui. Caso a empresa decida aumentar a frota própria,

apenas será necessário preencher devidamente os dados do novo veículo na tabela da base de dados e, caso decida não usar determinado veículo, apenas será necessário eliminar os seus dados.

Desta forma, conforme poderá ser verificado na Tabela 8, a base de dados de veículos possui os seguintes dados: o índice do veículo; a marca, modelo, ano e matrícula, a capacidade que o veículo apresenta para carga de paletes e peso em quilogramas e, por fim, o custo associado a cada um dos veículos.

Tabela 8 - Características da frota própria para o roteamento

iD	Marca	Modelo	Ano	Matrícula	Capacidade Paletes	Capacidade [kg]	Custo/km [€/km]
1	Mercedes-Benz	1318 (970 06)	2002	98-95-TU	16	6500	1,24
2	Mercedes-Benz	416 CDI	2005	46-04-ZP	7	1000	1,14
3	Mercedes-Benz	416 CDI	2005	13-96-ZT	7	1000	1,14
4	Veículo Infinito	Infinito	2210	A-22-10-E	100000	1000000	99

Como é possível verificar, na tabela de base de dados de veículos usada para efetuar o roteamento, Tabela 8, apresentam-se algumas diferenças relativamente à tabela da frota própria disponível apresentada anteriormente, ou seja, na Tabela 3. Estas diferenças residem sobretudo nas alterações da capacidade de carga dos três veículos que são posse da empresa, mas também na inclusão de um quarto veículo que é um veículo virtual.

As alterações referentes à capacidade de carga dos veículos devem-se ao facto de estes serem veículos refrigerados. Com isto, após dialogo com os motoristas, que até à introdução da ferramenta de roteamento continuarão a ser os responsáveis por efetuar o carregamento e roteamento dos veículos, no caso do veículo número 1, na tara apresentada na Frota Disponível, Tabela 3, esta não apresenta os valores do veículo já com o peso do revestimento da caixa de carga para frio, nem o peso do frigorífico e, assim, a tara real do veículo é mais elevada que a descrita. Deste modo, a capacidade de carga admissível diminui e, um carregamento até 6500 kg estará legal numa inspeção.

Relativamente aos veículos 2 e 3, apesar de a tara na Tabela 3 estar já incluído o peso dos revestimentos, bem como do frigorífico, sendo veículos de entrega de mercadoria, é considerado legal circular com carga até os 1000 kg.

Num outro ponto, a inclusão de um veículo virtual com capacidade infinita está relacionada com a possibilidade de em alguns dias as capacidades dos três veículos da empresa não conseguirem absorver o total das quantidades a serem entregues. Deste modo, caso existam encomendas com um volume total superior à capacidade da frota própria, as encomendas restantes serão encaminhadas para o veículo quatro (virtual),

para serem entregues pela frota subcontratada através do entreposto. Para evitar que todas as encomendas no cálculo de rotas vão parar a este veículo, este irá apresentar um custo muito superior que o custo aproximado calculado para os veículos da frota própria.

Relativamente à frota subcontratada, não seria necessária nenhuma base de dados de informação ou para sustentar o modelo matemático deste tipo de frota, pois, uma vez que todos os veículos a utilizar são homogêneos, as restrições surgirão diretamente no modelo matemático através de programação na ferramenta criada. No entanto, como é possível verificar na Tabela 9, a programação irá também considerar uma capacidade de carga admissível mais baixa que a capacidade de carga real apresentada na Tabela 4, devido ao peso do material isolante e do frigorífico no veículo.

Tabela 9 - Limitações da frota subcontratada para o modelo matemático

Quantidade de veículos	Capacidade Paletes	Carga Útil
Necessária para abastecer todos os clientes	33	22 toneladas

No entanto, a base de dados de veículos possui ainda uma tabela, conforme a Tabela 10, em que são indicados os preços de referência para cada tipo de serviço da frota subcontratada e, também o valor da condição para o rácio de entrega.

Tabela 10 - Tabela de valores de referência para a frota subcontratada

	Valor
Custo do serviço direto [€/km]	0,90
Custo do serviço via entreposto [€/kg]	0,09
Valor de condição do rácio de entrega	0,1

Como foi referido no subcapítulo 3.3, referente ao *clustering* da frota subcontratada, a condição do rácio de entrega que caracteriza as situações em que o transporte direto é mais vantajoso, presente na equação (3.1), depende diretamente dos custos estabelecidos para cada um dos serviços e, por fim, dependente deste rácio de entrega está todo o método de *clustering*.

Assim sendo, a inclusão desta tabela de custos permite que, caso os custos de transporte de cada um dos serviços da frota subcontratada se alterem, o valor de condição do rácio de entrega, assim como, o método de *clustering* serão alterados automaticamente para se adaptarem às novas condições e o modelo de negócio continuar a ser devidamente representado.

4.3 BASE DE DADOS DE DISTÂNCIAS

Uma base de dados de distâncias é algo fundamental para a realização de qualquer ferramenta de roteamento, pois o interesse de um método exato de cálculo de rotas será sempre minimizar a distância que um veículo irá percorrer para visitar um conjunto de clientes. Assim, havendo um conjunto de clientes aos quais devem ser efetuadas entregas, deverão ser conhecidas as distâncias de todas as combinações possíveis de trajetos.

Tendo a empresa, um número elevado de clientes ativos na base de dados aos quais são efetuadas entregas e, sendo um negócio com perspectiva de aumentar o volume de vendas assim como o número de clientes no futuro, a criação de uma base de dados de distâncias baseada na localização exata de cada cliente seria bastante difícil devido ao número elevado de distâncias a calcular.

Por outro lado, sempre que surgisse um novo cliente e fosse necessário acrescentar à base de dados de distâncias, seria necessário calcular a distância com origem no novo cliente e destino nos clientes já habituais da empresa e, para além disso, o sentido inverso.

Assim sendo, querendo a empresa que a ferramenta seja de uso fácil caso sejam acrescentados veículos ou clientes, é necessária a criação de um procedimento aproximado para que, caso sejam acrescentados novos clientes, não seja necessário efetuar quaisquer cálculos.

Com isto em mente, o método deverá ter distâncias baseadas em algum ponto que não irá mudar, ou que não seja expectável que mude. Deste modo, como a empresa deseja que a distância utilizada seja referente a um trajeto de estrada, apresentam-se algumas hipóteses para o método, tais como: distâncias entre distritos, distâncias entre concelhos, distâncias entre freguesias e, por fim, distâncias por código postal.

No entanto, sendo que Portugal continental possui apenas 18 distritos, o erro nas distâncias seria enorme caso o procedimento fosse baseado em distritos. Por outro lado, possuindo mais de 4000 freguesias, apesar de agora estarem reduzidas a pouco mais de 3000 devido às uniões de freguesias efetuadas, e visto haverem muitas mais combinações de código postal, o procedimento não se baseia em nenhum destes dois métodos de repartição devido à elevada quantidade de distâncias a serem calculadas, criando assim uma base de dados pesada para um ficheiro de cálculo.

Assim sendo, foi decidido que o método das distâncias a percorrer seria baseado nos concelhos que Portugal Continental possui, cerca de 278. Na realidade, grande parte das entregas são realizadas em centros de cidades ou, em zonas industriais de cidades.

A base de dados de distâncias consiste então, numa matriz com distâncias por estrada entre a localização exata da empresa até ao centro dos 278 concelhos de Portugal Continental, mas também com as distâncias de todas as combinações possíveis de

trajetos de todos os concelhos entre si, pois será dentro deste território que a empresa terá responsabilidade de efetuar as entregas.

Assim, para um trajeto entre clientes de concelhos diferentes, a distância será dada entre o centro dos dois concelhos. Este método simples, no entanto, obriga que caso os clientes estejam localizados no mesmo concelho, é necessário incluir uma distância entre esses clientes, pois caso contrário, usando o método da distância entre os centros da cidade a distância seria zero.

Com isto em mente, foi aplicada a ideia de representar o território de Portugal por pixéis, basicamente a ideia passa por transformar a área irregular dos concelhos em simples quadrados, como se pode verificar na Figura 16, no exemplo da transformação do concelho do Porto.



Figura 16 - Transformação dos concelhos da forma irregular para quadrada

Em seguida, a distância interna do concelho, isto é, a distância que deverá ser utilizada como referência para a distância a percorrer entre dois clientes do mesmo concelho, será a distância em linha reta desde o centro geométrico do quadrado até uma das arestas, ou seja, metade de uma aresta do concelho, calculada pela equação (4.1).

$$\text{Distância interna} = \frac{\sqrt{\text{Área do concelho}}}{2} \quad (4.1)$$

Deste modo, sempre que for preciso visitar mais que um cliente dentro do mesmo concelho, o cliente relativo à origem do trajeto será sempre reposicionado no centro do concelho, assim como o outro cliente, estará sempre posicionado numa das arestas. Caso seja necessário visitar outro cliente dentro do mesmo concelho, esse cliente que estava anteriormente posicionado numa aresta, passará para o centro do concelho e o cliente seguinte passará a estar numa aresta, e assim sucessivamente.

Como foi referido anteriormente, se o método fosse baseado em distritos iria apresentar um erro elevado, mas apesar de ser mais baixo, o procedimento criado por concelhos não está imune a um valor de erro no cálculo das distâncias.

Assim, para demonstrar que o erro existe, foi selecionado o concelho do Porto, já que tem sido usado para o exemplo deste método, e foram selecionados quatro clientes deste concelho através da função ALEATÓRIOENTRE do *Microsoft Excel*. Após selecionados, foram calculadas as distâncias reais entre todos os clientes e, por fim, calculado o erro comparando com a distância obtida pelo procedimento, como demonstra a Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 11 – Distâncias, em quilómetros, entre os clientes sorteados utilizando método criado

Índice Cliente sorteado	6	8	10	34
6	-	3	3	3
8	3	-	3	3
10	3	3	-	3
34	3	3	3	-

Tabela 12 - Distâncias reais, em quilómetros, entre os clientes sorteados

Índice Cliente sorteado	6	8	10	34
6	-	7,4	4,5	4,5
8	8,1	-	3,8	3,2
10	5,1	3,4	-	0,65
34	6,1	3,2	0,65	-

Tabela 13 – Erro do método criado relativamente à distância real

Índice Cliente sorteado	6	8	10	34
6	-	59%	33%	33%
8	63%	-	21%	6%
10	41%	12%	-	362%
34	51%	6%	362%	-

Conforme é perceptível, existem situações que apresentam um erro elevado, como é o caso do erro entre os clientes com índice 10 e 34, erro esse devido aos clientes estarem muito próximos um do outro. Outros exemplos, são as distâncias entre o cliente índice 6 com os restantes, devido a este cliente que foi sorteado se apresentar num dos extremos do concelho relativamente aos outros clientes sorteados.

Apesar do erro associado ao cálculo de distâncias, este método foi criado em conjunto com o diretor logístico da empresa e deverá ser usado devido à possibilidade de adicionar clientes sem a necessidade de efetuar novos cálculos de distâncias.

Além disso, como será uma ferramenta de apoio à decisão, estará sempre dependente da revisão de um responsável que, após o cálculo do roteamento estar definido, deverá rever a localização exata dos clientes presentes em cada rota e, reordenar a rota caso seja necessário.

4.4 RESULTADOS OBTIDOS

Neste subcapítulo serão apresentados resultados obtidos para 10 dias de atividade da empresa, pertencentes ao mês de março e abril de 2017, utilizando a ferramenta de apoio à decisão criada, comparando devidamente os resultados com os valores praticados no atual modelo de distribuição.

Inicialmente serão apresentados os valores obtidos pela frota própria de acordo o modelo atual e, em seguida, serão indicados os valores obtidos com o uso da ferramenta de apoio à decisão criada. Numa segunda fase, serão apresentados os resultados para a frota subcontratada, relativamente ao método utilizado no modelo atual, bem como, através da ferramenta criada. Por fim, serão descritos os resultados globais, isto é, utilizando as duas frotas que a empresa utiliza, para uma comparação final entre os dois métodos de distribuição.

Uma vez que um dos objetivos do novo modelo de distribuição é alargar o número de clientes que deverão ser abastecidos pela frota própria, retirando serviço da frota subcontratada e maximizando assim a capacidade dos veículos da empresa, o número de clientes presentes nas duas situações descritas será diferente.

Deste modo, sendo que o número de clientes a abastecer irá aumentar, poderá acontecer que o custo de transporte em algum dos dias de teste possa ser superior na ferramenta de otimização relativamente ao custo obtido através do método atual. Assim sendo, as duas situações não poderão ser comparadas relativamente ao custo de transporte calculado. No entanto, como a medida de referência para o transporte é o custo por quilograma, medida em €/kg, a comparação para a frota própria e subcontratada será efetuada com respeito ao valor dos quilogramas transportados em cada um dos casos, bem como, o custo por quilograma obtido para cada um dos dias de teste. Apenas para os resultados globais, será efetuada uma comparação total do custo de transporte, pois apenas nessa situação o número de clientes a fornecer e quilogramas a transportar será igual para os diferentes métodos.

A Tabela 14, apresenta os valores praticados para a frota própria para cada um dos dias de teste utilizando o método de roteamento do modelo atual de distribuição. A coluna N corresponde ao número de clientes que foram fornecidos nesses dias, enquanto que a coluna $K_{utilizado}$ representa o número de veículos utilizado, bem como, o número de rotas criadas. Quando ao lado do número de veículos está presente um * significa que um dos veículos utilizados é de aluguer a uma empresa do grupo, no entanto o custo por quilómetro considerado foi de 1,24 €, semelhante ao do veículo pesado da empresa, enquanto que, quando está presente ** significa que nesse dia, um dos veículos utilizados efetuou duas rotas no mesmo dia. Os valores de custo por quilómetro de cada veículo, bem como, as distâncias utilizadas para obter o custo total de transporte, são as presentes nas bases de dados da ferramenta criada.

Tabela 14 - Valores praticados para a frota própria através do modelo atual

Problema	N	Carga em kg	$K_{utilizado}$	Custo de transporte [€]	Custo por quilograma [€/kg]
1	13	5077	2	559,31	0,110
2	10	5584	3*	393,93	0,071
3	16	3689	2**	329,60	0,089
4	8	721	1	215,76	0,299
5	9	3289	2	520,97	0,158
6	16	3351	2	343,81	0,103
7	7	3153	2	391,05	0,124
8	9	2249	2	459,69	0,204
9	11	3521	2	429,96	0,122
10	16	5622	2	592,39	0,105

A Tabela 15, apresenta todos os valores calculados para um roteamento da frota própria utilizando a ferramenta de apoio à decisão. O cálculo foi realizado utilizando o software de otimização *IBM CPLEX 12.7.1*.

Tabela 15 - Valores calculados para a frota própria através da ferramenta de apoio à decisão

Problema	N	Carga em kg	$K_{utilizado}$	Custo [€]	Custo por quilograma [€/kg]	Tempo de cálculo [s]
1	15	5505	2	496,04	0,090	9,13
2	15	5869	2	308,84	0,053	493,03
3	21	4623	1	267,73	0,058	3,83
4	12	1773	2	342,93	0,193	19,98
5	10	3528	2	452,08	0,128	0,34
6	20	4550	2	433,50	0,095	766,39
7	8	3926	2	385,82	0,098	0,33
8	11	2945	2	472,74	0,161	2,08
9	14	4332	2	502,06	0,116	4,72
10	18	6080	2	515,83	0,085	19,72

A Tabela 16, apresenta uma comparação entre os dois métodos de roteamento. Relativamente à variação de clientes fornecidos e quilogramas transportados, o sinal positivo significa que a ferramenta de apoio à decisão criada conseguiu fornecer mais clientes e transportar mais quilogramas que o método utilizado atualmente para a distribuição de produto. Já relativamente à variação de custos, tanto em termos monetários como em percentagem, o sinal negativo significa uma redução desses custos, já o sinal positivo indica que para esse dia de teste, o método atual obteve um melhor resultado no custo que a ferramenta criada. Os valores mínimos na variação de custos referem-se ao dia em que a ferramenta gerou um pior resultado em relação ao modelo atual, enquanto que os máximos referem os melhores resultados obtidos.

Tabela 16 - Comparação entre as soluções obtidas utilizando a ferramenta de apoio à decisão e o método atual

	Variação de clientes fornecidos	Variação de carga em kg	Variação de custo de transporte [€]	Variação de custo por quilograma [€/kg]	Variação do Custo por quilograma [%]
Média	+ 3	+ 687,5	- 5,89	- 0,031	- 20,42
Mínimo	+ 1	+ 239	+ 127,17	- 0,006	- 04,92
Máximo	+ 5	+ 1199	- 85,09	- 0,106	- 35,45

Como é possível verificar pela Tabela 16, a ferramenta criada conseguiu atingir os objetivos propostos. Neste caso, como a variação mínima de clientes fornecidos e quilogramas transportados é positiva, com o uso ferramenta é possível aumentar o número de clientes a abastecer, e utilizar ao máximo a capacidade da frota própria tendo em conta as encomendas diárias.

Apesar de em alguns dias de teste, o custo de transporte ter sido superior ao modelo atual, o custo por quilograma transportado reduziu-se para todas os problemas calculados. Curiosamente, o dia de teste em que se verificou a maior diferença de custo de transporte relativamente ao obtido pelo método atual, verificou-se também a maior redução no custo por cada quilograma transportado.

Uma variação positiva dos custos de transporte, não significa que a ferramenta de apoio à decisão tenha obtido um pior resultado relativamente ao método atual. Uma vez que será necessário abastecer um número maior de clientes, poderá ser necessário efetuar um maior número de quilómetros e, conseqüentemente os custos de transporte irão aumentar. Em contrapartida, o número de quilogramas transportados aumenta e, assim deverá baixar o custo por quilograma.

Para os testes efetuados, a ferramenta conseguiu obter uma redução mínima aproximada de 1 cêntimo (0,006€) por cada quilograma transportado e, para o caso mais favorável, uma redução superior a 10 cêntimos por cada quilograma. Em termos de percentagem, a redução do custo por quilograma apresenta-se entre 4,92% e 35,45%.

Para os mesmos dias de teste, foram comparados os resultados obtidos para a distribuição através da frota subcontratada, utilizando o modelo atual de decisão e a ferramenta criada.

Uma vez que atualmente a empresa utiliza apenas o serviço de entrega ao cliente através do entreposto, e este serviço tem um custo aproximado de 0,09 €/kg, o custo total de transporte será o total de quilogramas a transportar a multiplicar pelo preço por quilograma de referência. A Tabela 17, apresenta os valores obtidos para a distribuição de produto acabado, calculados através do método utilizado no modelo atual.

Tabela 17 - Valores praticados para a frota subcontratada de acordo com o modelo atual

Problema	N	Carga em kg	Custo de transporte [€]	Custo por quilograma [€/kg]
1	27	23343	2100,87	0,09
2	34	12489	1124,01	0,09
3	37	36312	3268,08	0,09
4	35	30169	2715,21	0,09
5	34	32261	2903,49	0,09
6	32	29538	2658,42	0,09
7	26	28628	2576,52	0,09
8	40	42123	3791,07	0,09
9	28	19971	1797,39	0,09
10	26	22006	1980,54	0,09

Já relativamente ao cálculo de entregas para a frota subcontratada, uma vez que é efetuado um método de repartição previamente à resolução do método de solução exata, os resultados são apresentados para cada veículo de um determinado *cluster*, pertencente a cada dia de teste da ferramenta.

A Tabela 18, apresenta os valores obtidos apenas para o primeiro dia de teste definido, uma vez que existem vários problemas de teste, cada um com vários subproblemas, os resultados detalhados para todos os testes realizados estão presentes no ANEXO B. A primeira coluna P representa o número do problema de teste, a coluna “*Cluster*” define o índice do *cluster* criado pelo método de divisão e, as colunas K, N e Carga em kg, representam, respetivamente, o índice de cada veículo presente em cada *cluster*, o número de clientes a abastecer com esse veículo e, por fim, os quilogramas totais a entregar. Quando na coluna N, aparece o número de clientes juntamente com *, significa que um ou mais clientes estão localizados ilhas ou em território estrangeiro e, por essa razão, são agrupados como uma encomenda só para se efetuar apenas uma entrega no entreposto da empresa responsável pela distribuição final. Nesta Tabela 18, é então perceptível a divisão do problema inicial em 3 *clusters* com quatro veículos, assim como o custo calculado para o roteamento através do serviço direto, devidamente comparado com o serviço via entreposto.

Sempre que for necessário um veículo para efetuar determinada rota de abastecimento a clientes, além do custo por cada quilómetro percorrido, deverá estar associado um custo fixo de recolha de mercadoria no depósito da empresa. Como não há nenhum custo definido, para efeitos de teste foi considerado que o valor do custo de recolha de mercadoria seria 150 €. Deste modo, a coluna “*Custo de TD [€]*” diz respeito ao custo total do transporte direto (TD) calculado para cada veículo, incluído a recolha de mercadoria, bem como, todo o custo relacionado com a distância da rota.

Sendo uma ferramenta de apoio à decisão, também será sempre fornecido o resultado para cada veículo caso a mercadoria que lhe está atribuída fosse entregue via entreposto.

O método de *clustering* foi resolvido na aplicação criada no *Microsoft Excel*, enquanto que todos os resultados para os problemas de roteamento foram obtidos recorrendo ao software *IBM CPLEX 12.7.1*.

Tabela 18 - Valores obtidos para a frota subcontratada através da ferramenta de apoio à decisão

P	Cluster	K	N	Carga em kg	Custo de TD [€]	Custo por kg [€/kg]	Custo VE [€]	Tempo de cálculo [s]
1	1	1	2	5809	184,92	0,032	522,77	0,04
	2	1	2	4117	388,43	0,094	370,56	0,58
		2	12*	9041	590,32	0,065	813,65	
	3	1	9	3948	1068,87	0,271	355,36	0,05

A Tabela 19 é uma versão simplificada dos resultados, onde são apenas demonstrados os cenários obtidos escolhendo o serviço com custo mais baixo para cada veículo subcontratado, presente em cada um dos *clusters* criados nos problemas de teste.

Tabela 19 - Valores obtidos para a frota subcontratada optando pelo serviço mais barato para cada veículo

Prob.	kg _{ServiçoDireto}	Custo Serviço Direto [€]	kg _{ViaEntrepasto}	Custo VE [€]	Custo total [€]	Custo por kg [€/kg]
1	14850	775,24	8065	725,85	1501,09	0,066
2	4660	184,92	7544	678,96	863,88	0,071
3	31418	1658,34	3960	356,40	2014,74	0,057
4	25724	1244,52	3393	305,37	1549,89	0,053
5	24129	1230,95	7893	710,37	1941,32	0,061
6	25154	835,13	3185	286,65	1121,78	0,040
7	19164	768,98	8691	782,19	1551,17	0,056
8	35177	1642,69	6250	562,50	2205,19	0,053
9	13529	801,85	5631	506,79	1308,64	0,068
10	13453	226,25	8095	728,55	954,80	0,044

A Tabela 20, apresenta uma comparação entre os valores obtidos para a distribuição de produto acabado com recurso a frota subcontratada, utilizando o método atual de roteamento e a ferramenta de apoio à decisão criada.

Nesta comparação, todos os valores de variação com um sinal negativo, significam uma redução obtida através do uso da ferramenta de apoio à decisão relativamente ao método atual.

Tabela 20 - Comparação de resultados, da frota subcontratada, entre o método atual e a ferramenta de apoio à decisão para o roteamento criada

	Varição de clientes	Varição de kg	Varição de custo [€]	Varição de custo [%]	Varição de custo por kg [€/kg]	Varição de custo por kg [%]
Média	- 3	- 687,5	- 990,31	- 38,45	- 0,033	- 36,87
Mínimo	- 1	- 239	- 260,13	- 23,14	- 0,019	- 21,35
Máximo	- 5	- 1199	- 1585,88	- 57,80	- 0,050	- 56,02

Analisando a Tabela 20, é perceptível que a ferramenta de apoio à decisão criada é capaz de obter melhores resultados e, que correspondem de um melhor modo aos objetivos da empresa relativamente à para a distribuição da frota subcontratada.

A redução de clientes a fornecer e, de quilogramas a transportar pela frota subcontratada, como já foi abordado, é obtida através da passagem de clientes para a frota própria.

Já relativamente aos custos para os testes da frota subcontratada, deve ser apenas utilizado como comparação o custo por quilograma, uma vez que o número de clientes a visitar e os quilogramas a transportar não são iguais nos testes efetuados para os dois métodos.

Deste modo, analisando a variação do custo por quilograma, a ferramenta criada conseguiu, no pior dos testes realizados, uma redução aproximada de 2 cêntimos em cada quilograma a transportar e, no melhor dos cenários, uma redução de 5 cêntimos por quilograma. Traduzindo a variação para percentagem, para os testes realizados, a ferramenta criada apresenta reduções no custo por cada quilograma transportado entre 21,35% e 56,02%, face ao método de distribuição utilizado atualmente pela empresa.

Por fim, para ser possível uma comparação entre os custos totais de transporte do método aplicado atualmente na distribuição de produto acabado da empresa e a ferramenta de apoio à decisão criada, serão apresentados os cenários globais para cada um dos problemas de teste, incluindo a frota própria e a frota subcontratada em cada um dos métodos utilizados.

A Tabela 21 apresenta os valores globais, calculados através do método atual da empresa, para o transporte de produto acabado da empresa.

Tabela 21 - Valores globais para o transporte de acordo com o método atual da empresa

Prob.	Carga em kg	Custo transporte próprio [€]	Custo transporte subcontratada [€]	Custo transporte total [€]	Custo por kg [€/kg]
1	28420	559,31	2100,87	2660,18	0,094
2	18073	393,93	1124,01	1517,94	0,084
3	40001	329,60	3268,08	3597,68	0,090
4	30890	215,76	2715,21	2930,97	0,095
5	35550	520,97	2903,49	3424,46	0,096
6	32889	343,81	2658,42	3002,23	0,091
7	31781	391,05	2576,52	2967,57	0,093
8	44372	459,69	3791,07	4250,76	0,096
9	23492	429,96	1797,39	2227,35	0,095
10	27628	592,39	1980,54	2572,93	0,093

A Tabela 22, por sua vez, apresenta os valores globais do transporte de produto acabado, calculados através da ferramenta de apoio à decisão criada.

Tabela 22 - Valores globais para o transporte de acordo calculados pela ferramenta criada

Prob.	Carga em kg	Custo transporte próprio [€]	Custo transporte subcontratada [€]	Custo transporte total [€]	Custo por kg [€/kg]
1	28420	496,04	1501,09	1997,13	0,070
2	18073	308,84	863,88	1172,72	0,065
3	40001	267,73	2014,74	2282,47	0,057
4	30890	342,93	1549,59	1892,52	0,061
5	35550	452,08	1941,32	2393,40	0,067
6	32889	433,50	1121,78	1555,28	0,047
7	31781	385,82	1551,17	1936,99	0,061
8	44372	472,74	2205,19	2677,93	0,060
9	23492	502,06	1308,64	1810,70	0,077
10	27628	515,83	954,80	1470,63	0,053

A Tabela 23 compara os resultados globais obtidos com o método utilizado atualmente e com a ferramenta criada. Uma variação negativa indica os ganhos da ferramenta de apoio à decisão para o roteamento desenvolvida relativamente ao método atual.

Tabela 23 - Comparação de resultados globais entre o método atual de distribuição e a ferramenta de apoio à decisão criada

	Variação custo de transporte [€]	Variação custo de transporte [%]	Variação custo por quilograma [€/kg]	Variação custo por quilograma [%]
Média	- 996,20	- 33,12	- 0,031	- 33,12
Mínimo	- 345,22	- 18,71	- 0,018	- 18,71
Máximo	- 1572,83	- 48,20	- 0,044	- 48,20

Como é possível verificar na Tabela 23, a ferramenta desenvolvida apresenta resultados bastante promissores relativamente ao método que define a distribuição utilizado atualmente na empresa.

Uma vez que os resultados globais apresentam as mesmas dimensões, em termos de números de clientes a visitar e também quilogramas a entregar, é possível efetuar uma comparação entre os dois métodos baseada em custos.

Assim, para os problemas de teste calculados, a ferramenta desenvolvida sugere uma diminuição no custo de transporte média de 996,20 € face ao método atual. No pior dos cenários calculados, verifica-se uma redução de 345,22€, enquanto que, num cenário mais otimista, foi calculada uma redução de 1572,83 €. Em termos percentuais, a média da redução de custo é de 33,12% e varia entre 18,71% e 48,20%.

No que diz respeito ao custo por quilograma transportado, a ferramenta apresenta reduções médias de 0,031 €/kg, reduzindo no pior cenário calculado 0,018 € em cada quilograma e, no melhor cenário 0,044 € por quilograma transportado. Em percentagem, a redução do custo de quilograma média é também de 33,12% e varia entre 18,71% e 48,20%.

Considerando que um mês tem 20 dias de trabalho, isto é, 20 dias em existe transporte e distribuição de produto acabado, de acordo com o pior dos cenários obtidos, a ferramenta permite uma redução de aproximadamente 83000 € anuais relacionados com custos de transporte. Considerando o cenário mais otimista, seriam de esperar reduções de aproximadamente 377000 €.

CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES

5.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Na realização deste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta de apoio à decisão para a distribuição de produto acabado de acordo com o modelo de negócio de uma empresa do setor alimentar.

Uma vez que a empresa possui uma reduzida frota própria, destinada a abastecer um conjunto específico de clientes e recorre a frota subcontratada para fornecer os restantes, a ferramenta desenvolvida é capaz de dividir de uma forma mais eficiente baseada nas restrições da empresa, as encomendas que deverão ser entregues recorrendo a cada um dos tipos de frota existentes.

Com esta distribuição, é possível transferir serviços de entrega com frota subcontratada para a frota interna, conseguindo-se assim um melhor uso das capacidades dos veículos da frota própria. Desta forma, passarão a ser abastecidos pela frota interna novos clientes que respeitam as restrições da empresa que, até aqui, têm sido fornecidos pela frota subcontratada.

Visto a direção logística ter estabelecido como um dos objetivos a introdução de serviço de entrega direta com a frota subcontratada, serviço esse que até à data não existe, a ferramenta criada possui um método de *clustering* desenvolvido de acordo com o modelo de negócio da empresa. Este método é capaz de dividir as entregas da frota subcontratada, agrupando-as de acordo com as zonas de ação da empresa e, também, de acordo com o serviço mais vantajoso a efetuar. Isto é, identifica se será mais vantajoso o serviço de entrega direta ao cliente ou o serviço via entreposto, como atualmente é efetuado.

Além de uma divisão lógica das encomendas a efetuar por frotas e, posteriormente, por serviços disponíveis, a ferramenta desenvolvida é ainda capaz de efetuar um roteamento ótimo de acordo com as entregas a efetuar pela empresa. Este cálculo é conseguido através de um método de solução exata, mais concretamente, um modelo matemático de programação inteira, desenvolvido de acordo com as necessidades da empresa.

O método desenvolvido é capaz de realizar um cálculo de rotas ótimas para a frota própria, como também, para a frota subcontratada, e provou ser capaz de reduzir os custos de transporte da empresa, tendo sido calculadas reduções de custo de transporte médias de 996,20 €, que variam entre 18,71% e 48,20% face ao método utilizado atualmente na empresa. Relativamente à medida de referência, de acordo com a ferramenta desenvolvida, a redução no custo por quilograma obtida face ao modelo atual, no pior dos cenários foi de 18,71% e, no melhor dos cenários, aproximadamente 48,20%.

De acordo com os testes efetuados, considerando os piores dos cenários, a ferramenta de apoio à decisão prevê uma diminuição de custos anual a rondar 83000 €, podendo atingir, de acordo com o cenário mais otimista, uma redução de custos superior a 377000 €.

Foi ainda desenvolvido um ficheiro na folha de cálculo *Microsoft Excel* que permite a utilização desta ferramenta por qualquer operador da empresa, tendo ou não conhecimentos académicos na resolução neste tipo de problemas de otimização matemática. O ficheiro é bastante intuitivo, de fácil utilização, e permite ao utilizador, em tempo bastante reduzido, identificar as melhores soluções para o problema de distribuição do produto acabado, e simultaneamente adquirir uma maior sensibilidade de como se deve processar a distribuição de um conjunto de encomendas a efetuar.

Por fim, com os resultados obtidos, com a interface criada para a ferramenta de apoio à decisão para a distribuição, é possível que a gestão logística de distribuição fique centralizada num único responsável interno da empresa como estava definido pela Direção.

5.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Como proposta de trabalhos futuros, poderá ser efetuado um estudo para avaliar até que ponto as restrições da empresa relativamente ao transporte impedem a obtenção de melhores soluções para a distribuição de produto acabado a clientes.

Poderão assim ser abordados casos de estudo que verifiquem se realmente é compensatório o uso de frota própria para entrega de mercadoria ou, por exemplo, as vantagens que existiriam caso a frota própria fosse mais extensa e/ou fosse composta por um segmento de veículos com maior capacidade de carga.

**BIBLIOGRAFIA E FONTES DE
INFORMAÇÃO**

BIBLIOGRAFIA

- Applegate, D. L., Bixby, R. E., Chvatal, V., & Cook, W. J. (2011). *The traveling salesman problem: a computational study*: Princeton university press.
- Barnhart, C., Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., Savelsbergh, M. W., & Vance, P. H. (1998). Branch-and-price: Column generation for solving huge integer programs. *Operations research*, 46(3), 316-329.
- Beasley, J. E. (1983). Route first—cluster second methods for vehicle routing. *Omega*, 11(4), 403-408.
- Bellman, R. (2013). *Dynamic programming*: Courier Corporation.
- Christiansen, C. H., & Lysgaard, J. (2007). A branch-and-price algorithm for the capacitated vehicle routing problem with stochastic demands. *Operations Research Letters*, 35(6), 773-781.
- Christofides, N., Mingozzi, A., & Toth, P. (1981). Exact algorithms for the vehicle routing problem, based on spanning tree and shortest path relaxations. *Mathematical programming*, 20(1), 255-282.
- Dondo, R., & Cerdá, J. (2007). A cluster-based optimization approach for the multi-depot heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows. *European journal of operational research*, 176(3), 1478-1507.
- Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1472-1483.
- El-Sherbeny, N. A. (2010). Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods. *Journal of King Saud University-Science*, 22(3), 123-131.
- Estivill-Castro, V. (2002). Why so many clustering algorithms: a position paper. *ACM SIGKDD explorations newsletter*, 4(1), 65-75.
- Farahani, R., Rezapour, S., & Kardar, L. (2011). *Logistics operations and management: concepts and models*: Elsevier.
- Fisher, M. L., & Jaikumar, R. (1981). A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, 11(2), 109-124.
- Fukasawa, R., Longo, H., Lysgaard, J., de Aragão, M. P., Reis, M., Uchoa, E., & Werneck, R. F. (2006). Robust branch-and-cut-and-price for the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical programming*, 106(3), 491-511.
- Geoffrion, A. M. (1974). Lagrangean relaxation for integer programming *Approaches to integer programming* (pp. 82-114): Springer.
- Gillett, B. E., & Miller, L. R. (1974). A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem. *Operations research*, 22(2), 340-349.
- Hansen, P., & Jaumard, B. (1997). Cluster analysis and mathematical programming. *Mathematical programming*, 79(1-3), 191-215.
- Hoffman, K. L., Padberg, M., & Rinaldi, G. (2013). Traveling salesman problem *Encyclopedia of operations research and management science* (pp. 1573-1578): Springer.
- Jain, A. K., Murty, M. N., & Flynn, P. J. (1999). Data clustering: a review. *ACM computing surveys (CSUR)*, 31(3), 264-323.
- Kim, B.-I., Kim, S., & Sahoo, S. (2006). Waste collection vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 33(12), 3624-3642.
- Kumar, S. N., & Panneerselvam, R. (2012). A survey on the vehicle routing problem and its variants. *Intelligent Information Management*, 4(03), 66.
- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European journal of operational research*, 59(3), 345-358.
- Laporte, G., Gendreau, M., Potvin, J. Y., & Semet, F. (2000). Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International transactions in operational research*, 7(4-5), 285-300.
- Laporte, G., & Nobert, Y. (1983). A branch and bound algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *OR Spectrum*, 5(2), 77-85.

- Laporte, G., & Nobert, Y. (1987). Exact algorithms for the vehicle routing problem. *North-Holland Mathematics Studies*, 132, 147-184.
- Lau, H. C., Sim, M., & Teo, K. M. (2003). Vehicle routing problem with time windows and a limited number of vehicles. *European journal of operational research*, 148(3), 559-569.
- Lawler, E. L., & Wood, D. E. (1966). Branch-and-bound methods: A survey. *Operations research*, 14(4), 699-719.
- Lysgaard, J., Letchford, A. N., & Eglese, R. W. (2004). A new branch-and-cut algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical programming*, 100(2), 423-445.
- Mitchell, J. E. (2011). Branch and cut. *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*.
- Nallusamy, R., Duraiswamy, K., Dhanalaksmi, R., & Parthiban, P. (2010). Optimization of multiple vehicle routing problems using approximation algorithms. *arXiv preprint arXiv:1001.4197*.
- Psaraftis, H. N. (1980). A dynamic programming solution to the single vehicle many-to-many immediate request dial-a-ride problem. *Transportation Science*, 14(2), 130-154.
- Ruiz, R., Maroto, C., & Alcaraz, J. (2004). A decision support system for a real vehicle routing problem. *European journal of operational research*, 153(3), 593-606.
- Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations research*, 35(2), 254-265.
- Steinbach, M., Ertöz, L., & Kumar, V. (2004). The challenges of clustering high dimensional data *New directions in statistical physics* (pp. 273-309): Springer.

ANEXOS

ANEXO A

O ficheiro de roteamento criado possui sete folhas de cálculo *Excel*, sendo que apenas uma delas servirá para a interação entre a ferramenta e o operador e, das restantes seis, umas estarão reservadas com as bases de dados criadas e já descritas e, as restantes usadas para efetuar o cálculo de rotas para a frota própria e para a subcontratada. Além das folhas, estão programadas sete macros que visam facilitar o trabalho do operador, sendo elas: preencher os dados dos clientes, limpar as folhas de cálculo e entregas, cálculo de rotas para a frota própria, cálculo de rotas para frota subcontratada, adicionar novos clientes, adicionar novos veículos e, voltar à folha inicial apenas.

No que diz respeito à folha de cálculo, que servirá de interação com o operador, esta possui um design simples com apenas seis colunas e seis botões para serem ativadas as respectivas macros, conforme é visível na Figura 17.

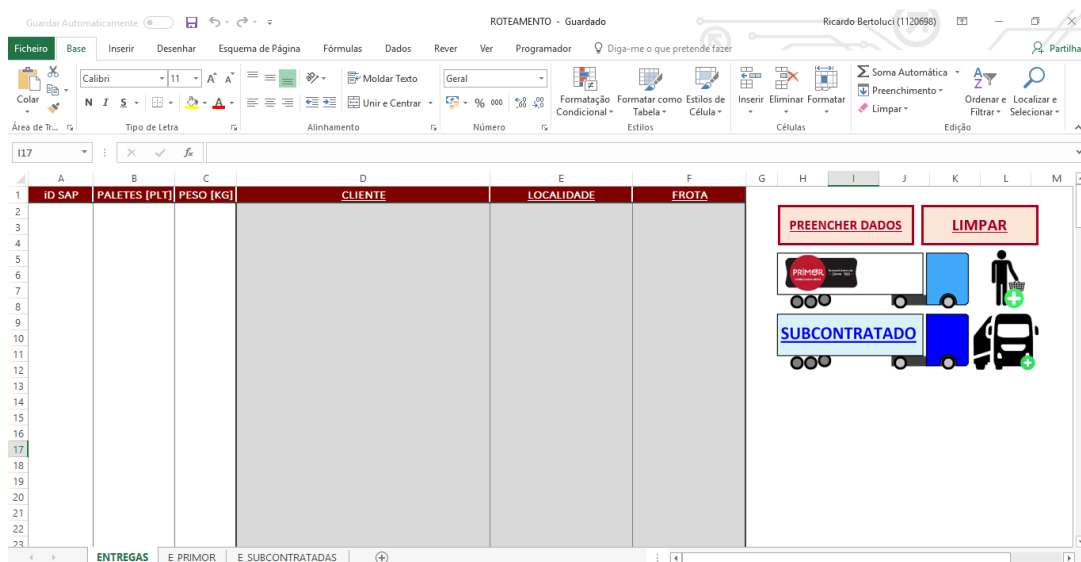


Figura 17 - Folha de interação entre ferramenta e operador

Relativamente à funcionalidade das colunas, três delas a fundo branco, estão reservadas para o operador inserir informações sobre as encomendas a efetuar, tais como: o número de identificação do cliente, o número de paletes que a encomenda possui e, por fim, o número de quilogramas totais da encomenda. Além destas colunas, existem outras três adicionais, a fundo cinzento, que serão preenchidas, quando a lista de encomendas a efetuar estiver completa, por ativação da macro responsável por preencher os dados, representada na Figura 17 no botão vermelho “PREENCHER DADOS”.

Deste modo, numa situação normal, em que não tenham ocorrido erros, como números de identificação de clientes inexistentes na base de dados e, números de paletes ou quilogramas de uma encomenda irrealistas, a macro “PREENCHER DADOS” deverá designar o nome do cliente a abastecer, a localidade em que será feita a entrega e, por fim, a frota utilizada no transporte.

Ainda assim, após o funcionamento da macro, será possível o operador alterar o tipo de frota a utilizar, bem como, a localidade de entrega de encomenda, pois existem clientes que possuem mais que uma localização e têm apenas um número de identificação. Na base de dados de clientes está designada apenas localização habitual de entrega e, quando necessário abastecer uma das infraestrutura diferente, o operador deverá alterar a localidade de entrega e frota a usar, manualmente.

Na Figura 18, é possível verificar um exemplo do funcionamento normal da macro, ainda que tenham sido utilizados números de identificação de clientes e designações fícticias.

iD SAP	PALETES [PLT]	PESO [KG]	CLIENTE	LOCALIDADE	FROTA
221017	1	1	DEMONSTRAÇÃO NÚMERO 1	Porto	SUBCONTRATADO
102217	1	1	DEMONSTRAÇÃO NÚMERO 2	Vila Nova de Famalicão	PRÓPRIA
212017	1	1	DEMONSTRAÇÃO NÚMERO 3	Barcelos	PRÓPRIA

Figura 18 - Situação normal de preenchimento dos dados através da macro

No entanto, caso ocorra um dos erros enunciados anteriormente na criação de lista de entregas a efetuar, serão geradas mensagens de aviso que servem para informar e ajudar o operador a corrigir o erro.

Desta feita, caso o erro esteja relacionado com o número de identificação do cliente, este poderá ser de dois tipos, ou foi introduzido um número errado ou o número introduzido não pertence à base de dados de clientes incluída na ferramenta. Assim, o número que está errado ou em falta na base de dados ficará com a célula pintada a vermelho e, posteriormente, será emitida uma mensagem de aviso ao operador com uma decisão que deverá ser tomada, como é possível verificar na Figura 19.

iD SAP	PALETES [PLT]	PESO [KG]	CLIENTE	LOCALIDADE	FROTA
221017	1	1	DEMONSTRAÇÃO NÚMERO 1	Porto	SUBCONTRATADO
102217	1	1	DEMONSTRAÇÃO NÚMERO 2	Vila Nova de Famalicão	PRÓPRIA
212017	1	1	DEMONSTRAÇÃO NÚMERO 3	Barcelos	PRÓPRIA
202117	1	1	iD SAP incorreto/não existente na DataBase	iD SAP incorreto/não exis	iD SAP incorreto/nã

ATENÇÃO!


 Foram inseridos números SAP incorretamente ou, não existentes na Base de Dados!
Por favor, corrija as células a vermelho ou, caso este seja um novo cliente, acrescente na Base de Dados!
Deseja adicionar um novo cliente?

Figura 19 - Erro relacionado com o número de identificação do cliente

Deste modo, surgirá uma mensagem de aviso ao operador, informando que ocorreu um erro relacionado com o número de identificação introduzido e, será pedida uma decisão em que o operador poderá ou não acrescentar o mesmo na base de dados.

Caso o erro esteja relacionado com a não existência do número de identificação do cliente na base de dados, o operador pode acrescentar o número apenas selecionando o botão “Sim” e, será automaticamente reencaminhado para a base de dados de clientes, onde poderá acrescentar devidamente o cliente e todas as suas informações. Por outro lado, caso o erro seja fruto de uma má introdução do número de identificação, o operador deverá selecionar o botão “Não” para, posteriormente, corrigir o número de cliente correto.

Além do erro do número de identificação, a macro “PREENCHER DADOS” é capaz de detetar outros erros relacionados com as quantidades de paletes e quilogramas de uma encomenda a ser efetuada.

Relativamente à quantidade de paletes, como os modelos matemáticos para roteamento, por serem de programação inteira, não permitem a divisão de quantidades a entregar por veículos diferentes e, sendo os veículos da frota subcontratada os que possuem maior capacidade, representadas na Tabela 9, nenhuma encomenda deverá possuir uma quantidade de paletes superior a trinta e três paletes e, sem esquecer, inferior a zero, pois é impossível haver uma situação com quantidades negativas de paletes a entregar. Com isto em mente, sempre que forem introduzidas quantidades de paletes inferiores a zero e maiores que trinta e três, a célula da respetiva encomenda ficará vermelha e, surgirá uma mensagem de aviso a informar o operador do erro cometido e a solicitar a sua correção, como é possível verificar na Figura 20.

ID SAP	PALETES [PLT]	PESO [KG]	CLIENTE	LOCALIDADE	FROTA
221017	1	1	DEMONSTRAÇÃO NÚMERO 1	Porto	SUBCONTRATADO
102217	34	1	DEMONSTRAÇÃO NÚMERO 2	Vila Nova de Famalicão	PRÓPRIA
212017	1	1	DEMONSTRAÇÃO NÚMERO 3	Barcelos	PRÓPRIA

ATENÇÃO! ✕

✕ Existem encomendas com o número de paletes a entregar inserido incorretamente!
Por favor, insira as quantidades corretas nas células a vermelho!

OK

Figura 20 - Erro relacionado com a quantidade de paletes a entregar

No que diz respeito às quantidades em quilogramas das encomendas a efetuar, pelos mesmos motivos apresentados para a quantidade de paletes, cada encomenda deverá ter um limite mínimo e, um máximo, de quilogramas a entregar. Como já referido, os veículos de frota subcontratada possuem maior capacidade e, desta forma, o limite de uma encomenda está associada à capacidade máxima deste tipo de veículos, também visível na Tabela 9. Assim sendo, quando introduzida uma quantidade de quilogramas de uma encomenda inferior a zero quilogramas e exceder vinte e duas toneladas (22000 kg), a célula respetiva ficará vermelha e será emitida uma mensagem de aviso com pedido de correção das quantidades introduzidas, conforme visível na Figura 21.

ID SAP	PALETES [PLT]	PESO [KG]	CLIENTE	LOCALIDADE	FROTA
221017	1	1	DEMONSTRAÇÃO NÚMERO 1	Porto	SUBCONTRATADO
102217	33	-3	DEMONSTRAÇÃO NÚMERO 2	Vila Nova de Famalicão	PRÓPRIA
212017	1	1	DEMONSTRAÇÃO NÚMERO 3	Barcelos	PRÓPRIA

ATENÇÃO!

Existem encomendas com o peso (em Kg) a entregar inserido incorretamente!
Por favor, insira as quantidades corretas nas células a vermelho!

Figura 21 - Erro da quantidade de quilogramas de uma encomenda introduzida

Somente após os dados estarem devidamente preenchidos pelo funcionamento da macro e, se for o caso, por alterações do operador, poderá iniciar-se o cálculo de rotas para qualquer tipo de frota. Existem para isso duas macros programadas, que são ativadas pelos dois botões com formato de camião como é visível na Figura 17, são responsáveis por efetuar o roteamento para a frota própria, onde o veículo apresenta o símbolo da empresa, e para a frota subcontratada, no veículo com a referência de “Subcontratado”.

Estas duas macros são praticamente iguais, apenas diferem em pequenos aspetos de programação sobretudo na programação das restrições dos modelos matemáticos, devido aos diferentes veículos a utilizar para cada roteamento. Além disso, como já foi referido no capítulo 3.3, a macro dedicada à frota subcontratada possui ainda uma parte da programação dedicada ao *clustering* das encomendas.

Desta feita, assim que os dados estejam devidamente preenchidos e se deva proceder o cálculo de rotas para a frota própria, a macro inicia o seu funcionamento pela criação de todas as combinações possíveis de trajetos, denominados no modelo matemático por arcos, com as respetivas distâncias a percorrer e custos associados, mas também, ao mesmo tempo associa aos nós destino de cada arco a procura em paletes e em quilogramas da encomenda a entregar. Este primeiro passo está presente na Figura 22.

ORIGEM	DESTINO	VEÍCULO	DISTÂNCIA [KM]	PROCURA [PLT]	PROCURA [KG]	CUSTO [€]
Primor	221017	1	40,75	0	22,00	50,52 €
Primor	102217	1	7,00	0	10,00	8,68 €
Primor	212017	1	32,21	0	17,00	39,94 €
Primor	Depósito Final	1	0,00	0	0,00	999,00 €
221017	102217	1	40,92	0	10,00	50,74 €
221017	212017	1	59,90	0	17,00	74,27 €
221017	Depósito Final	1	39,34	0	0,00	48,78 €
102217	221017	1	41,88	0	22,00	51,93 €
102217	212017	1	20,52	0	17,00	25,45 €
102217	Depósito Final	1	7,00	0	0,00	8,68 €
212017	221017	1	59,89	0	22,00	74,26 €
212017	102217	1	20,30	0	10,00	25,17 €
212017	Depósito Final	1	32,71	0	0,00	40,56 €
Primor	221017	2	40,75	0	22,00	46,45 €
Primor	102217	2	7,00	0	10,00	7,98 €
Primor	212017	2	32,21	0	17,00	36,72 €
Primor	Depósito Final	2	0,00	0	0,00	999,00 €

Figura 22 - Exemplo de trajetos possíveis, distâncias, custos e procuras associadas

Após o primeiro passo estar concluído, a macro elabora a função objetivo do modelo, as tabelas para as variáveis de decisão do modelo matemático, bem como, tabelas com fórmulas matemáticas para o cálculo da restrição *MTZ* que elimina os subpercursores, dos somatórios de cargas de veículos, distâncias a percorrer e, chegadas e partidas dos nós. A existência destas tabelas, visíveis na Figura 23 e na Figura 24, é fundamental para a introdução das restrições que vão permitir o bom funcionamento do modelo matemático e, conseqüentemente, o cálculo de rotas para os veículos.

Função Objetivo		CARGA [PLT]	CARGA [KG]	DISTÂNCIA	$\sum X_{ij}$	$\sum X_{0j}$		X_{ij}	W_{ij}	Cálculo	W_j
144,50 €	VEÍCULO 1:	0	0,00	0,00	0	0		0	0	-9958,255	0
144,50 €	VEÍCULO 2:	0	0,00	0,00	0	0		0	0	-9992	0
	VEÍCULO 3:	0	49,00	126,75	3	1		0	0	-9966,791	0
	VEÍCULO 4:	0	0,00	0,00	0			0	0	-9999	0
								0	0	-9958,083	0
								0	0	-9939,101	0
								0	0	-9959,658	0
								0	0	-9957,118	0
								0	0	-9978,477	0
								0	0	-9992	0
								0	0	-9939,112	0
								0	0	-9978,704	0
								0	0	-9966,294	0
								0	0	-9958,255	0
								0	0	-9992	0
								0	0	-9966,791	0
								0	0	-9999	0

Figura 23 – Função objetivo do modelo apresentada à esquerda, tabela de somatório de cargas e distâncias ao centro, e tabela de variáveis de decisão com cálculo para a restrição *MTZ*, apresentada à direita.

Chegam a:	Cliente	Veículo	Somatório	Saem de:	Cliente	Veículo	Somatório	Chegam a:	Cliente	Somatório	Saem de:	Cliente	Somatório
	Primor	1	0		Primor	1	0		Primor	0		Primor	1
	221017	1	0		221017	1	0		221017	1		221017	1
	102217	1	0		102217	1	0		102217	1		102217	1
	212017	1	0		212017	1	0		212017	1		212017	1
	Depósito Final	1	0		Depósito Final	1	0		Depósito Final	1		Depósito Final	0
	Primor	2	0		Primor	2	0						
	221017	2	0		221017	2	0						
	102217	2	0		102217	2	0						
	212017	2	0		212017	2	0						
	Depósito Final	2	0		Depósito Final	2	0						
	Primor	3	0		Primor	3	1						
	221017	3	1		221017	3	1						
	102217	3	1		102217	3	1						
	212017	3	1		212017	3	1						
	Depósito Final	3	1		Depósito Final	3	0						

Figura 24 - Tabelas de somatórios de chegadas e partidas dos nós, considerando cada um dos veículos, à esquerda, e, à direita, o somatório total.

Uma vez completas todas as tabelas, com a macro ainda em funcionamento, serão introduzidas no *OpenSolver*, um *solver add-in* para a plataforma *Microsoft Excel*, todas as restrições matemáticas presentes no modelo que são necessárias ao cálculo de rotas.

Para ser efetuado o cálculo de rotas, será necessário recorrer ao uso de um solver para resolver o problema matemático. Para a criação desta ferramenta, o solver escolhido foi o *OpenSolver* por várias razões.

Em primeiro lugar, apesar de o *Microsoft Excel* possuir um suplemento solver próprio, este não é suficiente para lidar com problemas de grande dimensão, em que são utilizadas imensas variáveis de decisão para o cálculo matemático, como é o caso deste problema.

Por outro lado, poderia ser utilizado paralelamente ao *Microsoft Excel*, um software de otimização e solver como por exemplo o *IBM ILOG CPLEX*, ou até mesmo o *Gurobi*. Porém, apesar de ambos serem reconhecidos como líderes mundiais a resolver este tipo de problemas matemáticos e serem de uso livre a estudantes universitários, são softwares que necessitam de um pagamento anual de uma licença quando se trata de uso profissional. Assim sendo, visto a ferramenta criada ter em vista o uso diário na empresa e, não estando esta disponível para comprar quaisquer licença, o solver escolhido deverá ser de carácter gratuito.

Deste modo, perante estas circunstâncias, sendo o *OpenSolver* gratuito, capaz para lidar com problemas de grandes dimensões, efetuar um cálculo bastante rápido e, também por ser um solver *add-in* ao *Microsoft Excel* com a possibilidade de ser controlado por programação de macros, a escolha para o cálculo do modelo matemático recai no *OpenSolver*.

A Figura 25 e a Figura 26, apresentam a aplicação das restrições do modelo matemático criado pelo *OpenSolver* nas tabelas previamente criadas.

Função Objetivo	CARGA [PLT]	CARGA [KG]	DISTÂNCIA	$\sum X_{ij}$	$\sum X_{0j}$	Xij	Wij	Cálculo	Wj
min 144,50 €	16 ≥ 0	6500 ≥ 0,00	0,00	3 * P0 ≥ 0	0	b	0	-9958,255	0
144,50 €	7 ≥ 0	1000 ≥ 0,00	0,00	3 * P0 ≥ 0	0	b	0	-9992	0
	7 ≥ 0	1000 ≥ 49,00	126,75	3 * P0 ≥ 0	1	b	0	-9966,791	0
	10000 ≥ 0	1000000 ≥ 0,00	0,00	3 * P0 ≥ 0		b	0	-9999	0
						b	0	-9958,083	0
						b	0	-9939,101	0
						b	0	-9959,658	0
						b	0	-9957,118	0
						b	0	-9978,477	0
						b	0	-9992	0
						b	0	-9939,112	0
						b	0	-9978,704	0
						b	0	-9966,294	0
						b	0	-9958,255	0
						b	0	-9992	0
						b	0	-9966,791	0
						b	0	-9999	0

Figura 25 - Parte 1 das restrições do modelo matemático criado

Chegam a:	Cliente	Veículo	Somatório	Saem de:	Cliente	Veículo	Somatório	Chegam a:	Cliente	Somatório	Saem de:	Cliente	Somatório
	Primor	1	0		Primor	1	1 ≥ 0		Primor	0		Primor	1
	221017	1	0		221017	1	= 0		221017	1 = 1		221017	1 = 1
	102217	1	0		102217	1	= 0		102217	1 = 1		102217	1 = 1
	212017	1	0		212017	1	= 0		212017	1 = 1		212017	1 = 1
	Depósito Final	1	0		Depósito Final	1	0		Depósito Final	1		Depósito Final	0
	Primor	2	0		Primor	2	1 ≥ 0						
	221017	2	0		221017	2	= 0						
	102217	2	0		102217	2	= 0						
	212017	2	0		212017	2	= 0						
	Depósito Final	2	0		Depósito Final	2	0						
	Primor	3	0		Primor	3	1 ≥ 0						
	221017	3	1		221017	3	= 1						
	102217	3	1		102217	3	= 1						
	212017	3	1		212017	3	= 1						
	Depósito Final	3	1		Depósito Final	3	0						

Figura 26 - Parte 2 das restrições do modelo matemático

Terminada a adição de todas as restrições, por ordem da macro, o *OpenSolver* irá iniciar o cálculo do modelo matemático. No final do cálculo, será emitida uma mensagem de aviso, conforme apresentada na Figura 27, que informa o operador responsável da rota que minimiza as distâncias a percorrer e, desta forma minimiza os custos de transporte diário, assim como, um custo total aproximado do transporte a efetuar.

ID SAP	PALETES [PLT]	PESO [KG]	CLIENTE	LOCALIDADE	FROTA
221017		ENTREGAS PRIMOR:		Porto	PRIMOR
102217				Vila Nova de Famalicão	PRIMOR
212017				Barcelos	PRIMOR

ENTREGAS PRIMOR:

VEÍCULO 1:
Sem entregas a efetuar por este veículo.

VEÍCULO 2:
Sem entregas a efetuar por este veículo.

VEÍCULO 3:
Primor - 102217 - 212017 - 221017 - Depósito Final

O transporte da frota própria terá um custo de: 144,5 [€].

Legenda:
Veículo 1: 98-95-TU;
Veículo 2: 46-04-ZP;
Veículo 3: 13-96-ZT;

Figura 27 - Mensagem de aviso ao operador com o custo e a rota definida

Até aqui foi descrito, o cenário normal em que se verifica haverem entregas a efetuar pela frota própria. No entanto, no caso de não haverem entregas atribuídas à frota própria, e por algum acaso for selecionado o botão de cálculo de rotas para os veículos da empresa, para poupar quaisquer erros e processamentos desnecessários, será emitida uma mensagem de aviso ao operador a informar do erro sucedido, conforme se pode verificar na Figura 28. A mesma mensagem, apenas com algumas alterações, aparecerá no caso de não haverem entregas a serem efetuadas pela frota subcontratada na lista de encomendas, e ser selecionado o botão de roteamento para frota subcontratada.

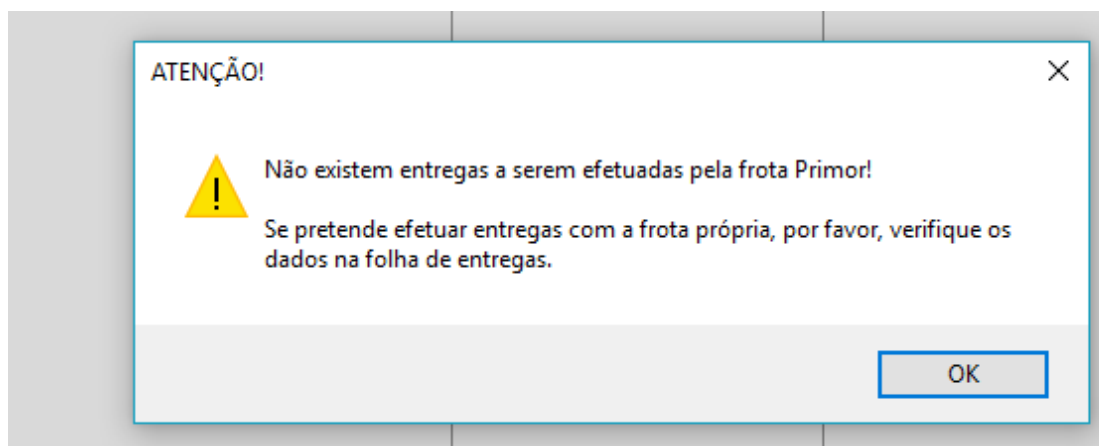


Figura 28 - Proteção contra a seleção involuntária do botão de cálculo

Já no que diz respeito ao funcionamento da macro para o cálculo de rotas para a frota subcontratada, apesar em parte ser praticamente igual à macro da frota própria e de utilizar o mesmo modelo matemático, esta apresenta algumas grandes diferenças.

Assim sendo, uma das diferenças está na inclusão do método de *clustering*, isto é, a repartição do problema inicial com a lista de todas as encomendas subcontratadas a efetuar, em várias listas de encomendas mais reduzidas. Deste modo, este será o primeiro passo de funcionamento da macro.

Como consequência da divisão do problema inicial, esta origina que o roteamento em vez de ser efetuado num cálculo só, como acontece para a frota própria da empresa, será efetuado através de vários cálculos, isto é, o roteamento será conseguido através de um cálculo para cada *cluster*.

Desta forma, depois a lista de encomendas estar completa na lista de entregas a efetuar e, após ser selecionado o botão da macro para o cálculo de rotas para a frota subcontratada, este irá iniciar-se com a divisão do problema, seguindo o método previamente explicado no subcapítulo 3.3. Um exemplo dos *clusters* formados, está presente na Figura 29.

CLUSTER 1	PALETES	PESO [KG]	CLUSTER 2	PALETES	PESO [KG]	CLUSTER 3	PALETES	PESO [KG]
Vila Nova de Famalicão	18	7141,65	Azambuja	15	6402,41	Faro	1	233,116
Maia	9	3998,316	Palmela	4	1883,7	Albufeira	1	554,344
Vila do Conde	4	1819,06						

Figura 29 - Exemplo de *clusters* formados para a lista de encomendas a efetuar com frota subcontratada

Terminada a formação dos *clusters*, a macro programada irá efetuar o cálculo de rotas apenas para os clientes presentes em cada um dos *clusters* criados, utilizando o mesmo procedimento que foi descrito para o roteamento da frota própria.

Assim sendo, para cada um dos *clusters*, o método inicia-se pela criação de todas as combinações de arcos possíveis, associando sempre as devidas distâncias e custos aos arcos presentes, bem como, as procuras respectivas aos nós de destino de cada arco. Findada esta criação, são criadas todas as tabelas de variáveis de decisão e fórmulas necessárias para todas as restrições do modelo matemático. São, em seguida, aplicadas todas as restrições do modelo matemático criado utilizando, mais uma vez, o OpenSolver.

No entanto, estando a frota subcontratada dividida em dois tipos de serviço, o transporte direto e o transporte via entreposto, e será sempre efetuado o serviço mais barato, a macro para o roteamento apresenta um ligeiro pormenor que irá poupar tempo de cálculo.

Desta forma, sabendo que o tempo elevado de cálculo está diretamente ligado ao facto de o modelo matemático ser de programação inteira e, visto a função objetivo ser minimizar os custos de transporte, é possível resolver uma relaxação linear para que seja obtido um limite inferior para o custo de transporte. Isto significa que, apesar de não ser o valor final do custo para o roteamento, a solução inteira do modelo matemático nunca terá um valor custo mais baixo que o valor da relaxação linear.

Considerando este princípio, se o valor do custo obtido da relaxação linear for superior ao custo total de envio da mercadoria pelo serviço via entreposto, não será então necessário efetuar cálculo de uma rota. Com isto, pretende-se reduzir o tempo total para obter um roteamento, ou indicação de se efetuar serviço de entrega via entreposto, para um conjunto de entregas a efetuar.

Por outro lado, caso o limite inferior do custo de transporte, valor da relaxação linear do modelo matemático, for interior ao custo total do transporte via entreposto, deverá ser efetuado um cálculo normal de rotas.

Ainda paralelamente ao cálculo normal de rotas, será calculado o valor de custo para o serviço via entreposto para todos os veículos que deverão ser utilizados. Uma vez que o serviço de envio direto ao cliente poderá compensar para um *cluster* inteiro em que são usados mais que um veículo, isto é, a soma do custo de envio direto de todos os veículos do *cluster* ficar mais baixo que o valor do serviço via entreposto, no entanto, por exemplo, em um dos veículos utilizados poderá ser mais vantajoso não usar o serviço direto. Assim sendo, este cálculo servirá para ajudar o operador a tomar uma decisão mais precisa sobre qual o serviço de transporte optar para as entregas serem efetuadas. O roteamento para a frota subcontratada ficará completo assim que forem calculados todos os *clusters* existentes.

No final do roteamento, serão emitidas duas mensagens para interação com o operador. A primeira delas irá informar o operador dos veículos e encomendas que possuem rotas para o transporte direto e o seu custo de transporte, mas também designará os veículos que deverão ser subcontratados para efetuarem serviço de entrega via entreposto por não respeitarem o princípio da relaxação linear. A segunda mensagem servirá apenas para comparação de custos, uma vez que irá apresentar o valor de serviço de entrega via entreposto para efetuar a entrega da mercadoria presente em cada veículo.

Após as duas mensagens serem emitidas, visto ser apenas uma ferramenta de apoio à decisão, caberá ao operador responsável pelo transporte decidir o serviço mais vantajoso para cada uma das encomendas, normalmente será o que apresentar custo mais baixo. Será também necessário retificar o número total de veículos para o serviço via entreposto a subcontratar, após a junção de todas as encomendas com este serviço.

Na Figura 30 à esquerda, é possível verificar a primeira mensagem de interação, onde os dois primeiros veículos possuem rota de serviço direto, enquanto que, o terceiro veículo foi atribuído automaticamente para o serviço de transporte via entreposto por apresentar um custo total mais reduzido que o valor da relaxação linear do modelo. Já à direita da Figura 30, é apresentada a segunda mensagem para o operador com os custos de transporte recorrendo ao serviço via entreposto. Por observação e pela lógica de escolher o serviço mais barato, para o exemplo demonstrado, os clientes do Veículo 1 e 2 iriam ser servidos diretamente, enquanto o veículo 3 iria servir os clientes através do entreposto.

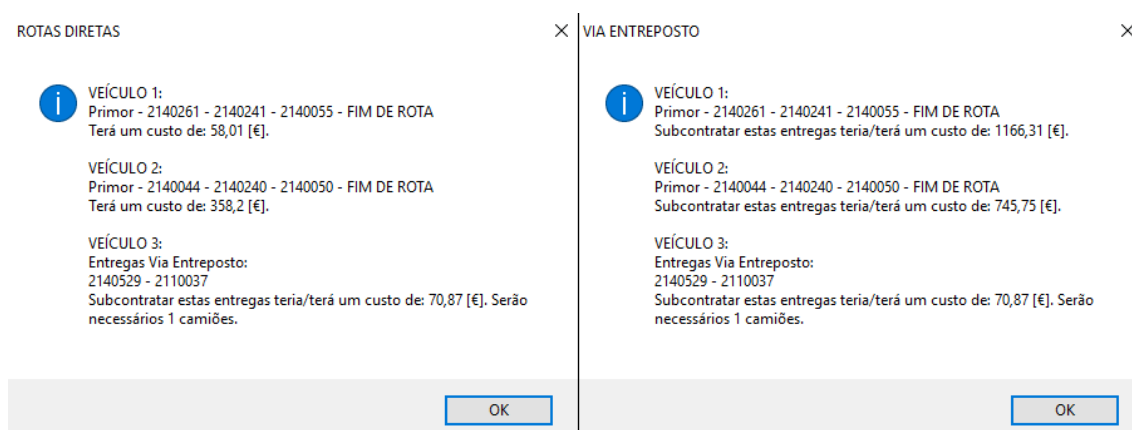


Figura 30 – Duas mensagens de interação com o operador após roteamento de frota subcontratada

Terminada a descrição de todas as folhas de cálculo utilizadas na ferramenta, bem como três das sete macros criadas, fica a faltar a descrição das macros “Limpar”, “Acrescentar novo veículo”, “Acrescentar novo cliente” e “Voltar”.

Desta forma, a macro “Limpar”, demonstrada na Figura 17 como um botão vermelho, serve apenas e só para limpar a folha de interação com o operador onde são introduzidas as entregas a efetuar, bem como, as duas folhas de cálculo reservadas para o roteamento das duas frotas.

Por sua vez, a macro “Acrescentar novo veículo”, botão presente na Figura 17 como um camião preto com um sinal de adição a verde, servirá para acrescentar um novo veículo à frota própria da empresa, caso em qualquer altura a empresa decida adquirir um novo veículo. Assim que o botão for selecionado, o operador é automaticamente direcionado para a base de dados de veículos onde poderá adicionar o novo veículo, assim como, as suas características necessárias.

A macro “Acrescentar novo cliente”, que funcionará quando for selecionado o botão com a forma de um cliente com o sinal de adição verde na Figura 17, tem o mesmo princípio de funcionamento que a macro “Acrescentar novo veículo”. Assim sendo, sempre que for necessário acrescentar um novo cliente à base de dados de clientes, basta selecionar o botão que o operador é automaticamente encaminhado para a base de dados onde poderá adicionar devidamente o novo cliente. Esta macro funciona um pouco à semelhança do que acontece quando surge um erro relacionado com a falta do número de identificação de um cliente no decorrer da macro “Preencher dados” e o operador opta por o adicionar à base de dados.

Por fim, a macro “Voltar”, assim como o nome indica servirá para o operador voltar à folha de início onde serão programadas as entregas após adicionar um novo veículo ou um novo cliente. Desta forma, esta macro, ativada pelo botão vermelho visível na Figura 31, está apenas disponível nas bases de dados de veículos e clientes e, assim que for ativada encaminha o operador para a folha inicial, bem como, oculta novamente as folhas das bases de dados para evitar qualquer erro desnecessário.

CUSTO [€/KM]		CUSTO
1,24 €	FROTA SUBC. DIRETA [€/KM]	0,90 €
1,14 €	FROTA SUBC. V.E. [€/KG]	0,09 €
1,14 €	RÁCIO DE ENTREGA	0,10 €
99,00 €		

VOLTAR

Figura 31 - Botão que ativa a macro "Voltar" na base de dados de veículos

Desta feita, terminada a descrição da ferramenta, numa situação de trabalho normal em que as bases de dados estarão em dia, o operador responsável pelo transporte para efetuar o roteamento de entregas diárias, não deverá ter preocupações adicionais a não ser preencher a lista de entregas a efetuar e, tomar as decisões finais sobre o serviço e roteamento escolhido para o transporte de produto acabado ao cliente.

ANEXO B

Tabela 24 - Resultados dos problemas de teste para a frota subcontratada através da ferramenta de apoio à decisão

Prob.	Cluster	K	N	Carga em kg	Custo de TD [€]	Custo por kg [€/kg]	Custo TVE [€]	Tempo de cálculo [s]
1	1	1	2	5809	184,92	0,032	522,81	0,04
	2	1	2	4117	388,43	0,094	370,53	0,58
		2	12*	9041	590,32	0,065	813,69	
	3	1	9	3948	1068,87	0,271	355,32	0,05
2	1	1	2	4660	184,92	0,040	419,40	0,04
	2	1	12	3729	589,43	0,158	335,61	0,03
	3	1	3	1541	437,64	0,284	138,69	0,06
	4	1	3	439	700,30	1,595	39,51	0,02
	5	1	2	673	465,39	0,692	60,57	0,02
	6	1	7	1162	1087,13	0,936	104,58	0,06
3	1	1	3	7087	208,01	0,029	637,83	0,05
	2	1	5	8635	482,34	0,056	777,15	3,69
		2	13*	10226	586,76	0,057	920,34	
		3	1	5470	381,23	0,070	492,30	
	3	1	2	1130	688,60	0,609	101,70	0,04
	4	1	2	535	241,18	0,451	48,15	0,04
	5	1	6	2295	786,49	0,343	206,55	0,06
4	1	1	4	8210	222,91	0,027	738,90	0,05
	2	1	9*	10960	582,65	0,053	986,40	1,98
		2	3	6554	438,96	0,067	589,86	
	3	1	4	937	697,60	0,745	84,33	0,09
	4	1	11	2456	910,43	0,371	221,04	0,16
5	1	1	2	7091	184,92	0,026	638,19	0,04
	2	1	13	10057	614,27	0,061	905,13	439,64
		2	3	6981	431,76	0,062	628,29	
	3	1	3	4111	691,09	0,168	369,99	0,04
	4	1	2	357	259,94	0,728	32,13	0,04
	5	1	10	3425	1078,40	0,315	308,25	0,05
6	1	1	3	9829	233,65	0,024	884,61	0,22
	2	1	15*	15325	601,48	0,039	1379,25	0,23
	3	1	2	1120	688,60	0,615	100,80	0,04
	4	1	2	859	267,81	0,312	77,30	0,04
	5	1	6	1206	802,84	0,666	108,54	0,01
7	1	1	2	9790	184,92	0,019	881,10	0,05
	2	1	2	3046	388,43	0,128	274,14	0,75
		2	10	9374	584,06	0,062	843,66	
	3	1	2	1151	259,94	0,226	103,59	0,04
	4	1	2	3378	688,59	0,204	304,02	0,04
	5	1	7	1116	753,03	0,675	100,44	0,09
8	1	1	1	5046	177,60	0,035	454,14	0,02
	2	1	2	6767	388,43	0,057	609,03	160,59
		2	5	10364	540,31	0,052	932,76	
		3	12*	13000	536,35	0,041	1170,00	

	3	1	4	3732	704,80	0,189	335,88	0,02
	4	1	2	262	259,94	0,992	23,58	0,03
	5	1	12	2256	986,00	0,437	203,04	0,17
9	1	1	1	1992	176,60	0,089	179,28	0,02
	2	1	14	11537	625,25	0,054	1038,33	0,19
	3	1	3	4951	693,10	0,140	445,59	0,03
	4	1	7	680	708,25	1,042	61,20	0,05
10	1	1	4	13453	226,25	0,017	1210,77	0,05
	2	1	5	2186	727,06	0,333	196,74	0,03
	3	1	2	1307	389,80	0,298	117,63	0,04
	4	1	8	3936	563,31	0,143	354,24	0,22
	5	1	5	666	795,58	1,195	59,94	0,03
