



**Patrícia Isabel Rosa Apolinário**

Licenciatura em Ciências de Engenharia e Gestão Industrial

## **Otimização das Rotas de Recolha de Alimentos na Re-food Almada**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia e Gestão Industrial

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Doutora Helena Maria Lourenço Carvalho Remígio,  
Professora Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa

Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Doutora Carina Maria Oliveira Pimentel, Professora Auxiliar,  
Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e  
Turismo da Universidade de Aveiro

Júri:

Presidente: Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos,  
Professora Associada da Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Arguentes: Doutor Filipe Pereira Pinto Cunha Alvelos,  
Professor Associado da Escola de Engenharia da  
Universidade do Minho

Vogais: Doutora Helena Maria Lourenço Carvalho Remígio,  
Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

**Março, 2021**



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

### **Otimização das Rotas de Recolha de Alimentos na Re-food Almada**

Copyright © Patrícia Isabel Rosa Apolinário, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus avós, que tanto me amam e amaram.

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, ao Sr. António, responsável pela Re-food Almada, no início do ano de 2020. Pelas conversas que teve comigo, desabafos e compreensão. Por me explicar tudo o que achou necessário para que pudesse desenvolver o meu trabalho da melhor forma. Agradeço ainda a todos os voluntários que se cruzaram no meu caminho por serem recetivos, me explicarem os seus pontos de vista e me acolherem como mais um membro da equipa.

Agradeço à minha orientadora, Professora Helena Carvalho pela oportunidade e confiança depositada para realizar esta dissertação, por toda a atenção, apoio e disponibilidade, que me dedicou em qualquer momento.

Gostaria também de agradecer à minha coorientadora, Professora Carina Pimentel, pela disponibilidade e ajuda que me ofereceu, permitindo atingir os objetivos propostos neste trabalho. Agradeço ainda ao Professor João Cardoso, pelos conselhos, disponibilidade e dúvidas esclarecidas no que toca ao “mundo dos computadores”.

De seguida, gostaria de agradecer ao César, que para além de tio é um grande amigo, sempre disposto a ouvir-me e auxiliar-me. Agradeço-lhe por todas as horas que me dedicou, tentando amparar as minhas dúvidas e incertezas ao longo deste trabalho. Sem ele, sem dúvida, que não teria conseguido.

Agradeço ao meu pai, mãe e madrinha por serem exemplos de força, empenho e dedicação na minha vida. Agradeço-lhes por aturarem os meus dias de mau humor durante a realização deste trabalho e por terem sempre palavras de conforto para me dar. Devo-lhes muito.

Agradeço ao meu irmão, por sem se aperceber me incentivar a ser melhor, para que eu possa ser seu exemplo de coragem e determinação. À minha avó Rosa que sempre me encorajou e me deu os melhores abraços de força mesmo que à distância. Ao meu avô Manuel e António por serem sempre carinhosos e cuidadosos comigo. E por fim, agradeço à minha avó Etelevina que todos os dias me teve nas suas orações para que eu conseguisse finalizar e realizar este trabalho da melhor forma.

Gostaria de agradecer a todos os meus amigos que têm acompanhado o percurso durante o desenvolvimento deste trabalho, por terem sempre palavras de incentivo para me dar e me motivarem sempre a ser e fazer melhor. Agradeço, especialmente, à minha amiga Andreia Almeida que foi um pilar durante todo este ano, que me amparou, ouviu e me deu coragem para que conseguisse seguir em frente e concluir esta dissertação.

E por fim, gostaria de agradecer ao meu namorado Nuno Paulo, por todo o amor e carinho que me tem tido durante estes anos, por ser paciente e compreensivo, por me dar força e me encorajar a ser uma Patrícia melhor.



# Resumo

A Re-food Almada é uma organização sem fins lucrativos, que tem como missão combater o desperdício alimentar e simultaneamente combater a fome da população mais necessitada no concelho de Almada. O funcionamento da organização só é possível com o apoio de todos os voluntários, os quais exercem todas as atividades necessárias.

Como para qualquer organização que envolva rotas de veículos, é fundamental para a Re-food Almada que as mesmas sejam o mais otimizadas possível, para que sejam despendidos apenas os recursos necessários. A logística e gestão das rotas de recolha de alimentos na organização envolvem os voluntários e os doadores de alimentos e, atualmente, dependem exclusivamente do conhecimento tácito dos voluntários responsáveis. Esta forma de proceder leva a que as rotas definidas sejam pouco eficientes, assim como ocasiona uma inadequada afetação dos voluntários às mesmas.

Esta dissertação propõe uma forma de otimizar as rotas de recolha de alimentos na Re-food Almada baseada em modelos matemáticos de otimização adaptados ao problema. Para que o objetivo seja alcançado, o problema apresentado é dividido em dois problemas: reestruturação das rotas, recorrendo ao Problema de Roteamento de Veículos com Janelas Temporais, e afetação dos voluntários às rotas definidas anteriormente recorrendo ao Problema de Afetação Generalizado. Ambos os problemas serão resolvidos através do *software CPLEX Optimization Studio*.

Para o primeiro problema, conclui-se que o tempo de computação de que o *software* necessita para obter uma solução perto da solução ótima varia consideravelmente consoante a função objetivo e as restrições definidas. No entanto, para o segundo problema, verifica-se que é possível obter a solução ótima de forma eficiente, apresentando à organização uma alternativa para afetar os seus voluntários às rotas.

**Palavras-chave:** Organização Sem Fins Lucrativos, Otimização, Problema de Roteamento de Veículos com Janelas Temporais, Problema de Afetação Generalizado, *CPLEX Optimization Studio*



# Abstract

Re-food Almada is a non-profit organization whose mission is to fight food waste and simultaneously fight hunger for the most vulnerable population of the municipality of Almada. The work of the organization is only possible with the support of all volunteers, who perform all the necessary activities.

As for any organization that involves vehicle routes, it is essential for Re-food Almada that its routes are as optimized as possible, so that only the necessary resources are spent. The logistics and management of the food collection routes involve volunteers and food donors and currently depend exclusively on the tacit knowledge of the volunteers in charge. This procedure means that the defined routes are not very efficient. Additionally, it also causes an inadequate allocation of volunteers.

In this dissertation is proposed a way to optimize the food collection routes in Re-food Almada based on mathematical optimization models adapted to the problem. In order to achieve the set objective, the presented problem is divided into two: restructuring the routes, using the Vehicle Routing Problem with Time Windows, and assigning volunteers to the previously defined routes using the Generalized Affection Problem. Both problems will be solved using the *CPLEX Optimization Studio software*.

For the first problem, it is concluded that the necessary computation time to obtain a solution close to optimal varies considerably depending on the objective function and the defined restrictions. However, for the second problem, it was possible to obtain the optimal solution efficiently, presenting the organization with an alternative to affect its volunteers on the routes.

**Key Words:** Nonprofit Organization, Optimization, Vehicle Routing Problem with Time Windows, Generalized Assignment Problem, *CPLEX Optimization Studio*



# Índice

1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento e Apresentação do Problema .....	1
1.2. Re-food Almada .....	2
1.3. Objetivos e Abordagem Metodológica.....	4
1.4. Estrutura da Dissertação .....	5
2. Estado de Arte .....	7
2.1. Desperdício Alimentar e o Papel das ONG .....	7
2.2. Logística Inversa e Economia Circular na Indústria Alimentar .....	10
2.3. Problema de Roteamento de Veículos.....	13
2.3.1. Problema de Roteamento de Veículos com Janelas Temporais .....	17
2.4. Afetação de Recursos Humanos.....	21
3. Estudo de Caso da Re-food Almada.....	25
3.1. Metodologia de Investigação.....	25
3.2. Processo Atual da Construção de Rotas .....	29
3.3. Processo Atual da Afetação dos Voluntários às Rotas .....	34
4. Problema de Determinação de Rotas de Recolha de Alimentos na Re-food Almada .....	37
4.1. Introdução do VRPTW na Re-food Almada .....	37
4.1.1. Formulação Matemática .....	39
4.1.2. Exemplo de Aplicação do Modelo Matemático VRPTW <sub>2</sub> .....	44
4.1.3. <i>Software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio</i> e Exemplo de Aplicação do Modelo Matemático VRPTW <sub>2</sub> .....	48
4.1.4. Aplicação do VRPTW ao Caso de Estudo e Discussão dos Resultados Obtidos..	50
5. Afetação de Recursos Humanos a Rotas de Veículos .....	63
5.1. Introdução do Problema de Afetação de Recursos Humanos às Rotas da Re-food Almada.....	63
5.1.1. Formulação Matemática e Exemplo de Aplicação .....	64
5.2. Aplicação do PAG ao Caso de Estudo .....	69
6. Conclusões.....	76
7. Referências Bibliográficas.....	78
Anexos .....	91
Anexo A: Descrição sucinta do Algoritmo <i>Branch-and-Bound</i> .....	91

Anexo B: Questionário realizado aos voluntários que realizam rotas de recolha de alimentos na Re-food Almada .....	92
Anexo C: Rotas de Veículos Atualmente Implementadas na ONG.....	93
Anexo D: Formulário de Inscrição Re-food Almada.....	94
Anexo E: Implementação do modelo PLIM para o exemplo do VRPTW <sub>2</sub> no <i>software</i> CPLEX .....	95
Anexo F: Excerto dos dados fornecidos ao modelo de PLIM para o dia de domingo.....	99
Anexo G: Rotas Reestruturadas na Re-food Almada .....	101
Anexo G1: Rotas de Recolha para Segunda-feira .....	101
Anexo G2: Rotas de Recolha para Terça-feira.....	109
Anexo G3: Rotas de Recolha para Quarta-feira .....	110
Anexo G4: Rotas de Recolha para Quinta-feira .....	111
Anexo G5: Rotas de Recolha para Sexta-feira .....	112
Anexo G6: Rotas de Recolha para Domingo .....	113
Anexo H: Implementação do modelo PLI para o exemplo do PAG no <i>software</i> CPLEX ...	114

## Índice de Figuras

Figura 1.1 - Re-food Almada em janeiro 2020.....	3
Figura 2.1 - Hierarquia segundo a Economia Circular para gestão de desperdícios de alimentares.....	12
Figura 2.2 - Variantes do VRP .....	16
Figura 3.1 - Metodologia de um estudo de caso.....	26
Figura 3.2 - Metodologia aplicada ao presente estudo de caso .....	26
Figura 3.3 - Ligação entre os dois modelos matemáticos .....	29
Figura 3.4 – Mapa do Concelho de Almada com a sinalização dos doadores e CO .....	30
Figura 3.5 - Disponibilidade dos voluntários para serem afetados a uma rota diferente.....	32
Figura 3.6 - Disponibilidade dos voluntários para visitar mais do que um doador .....	32
Figura 3.7 - Localização inicial da rota .....	33
Figura 3.8 - Disponibilidade dos voluntários para colaborar com a ONG .....	35
Figura 4.1 - Mapa do Concelho de Almada com identificação de doadores e depósitos .....	38
Figura 4.2 - Exemplo ilustrativo das rotas possíveis com recurso aos 3 depósitos .....	45
Figura 4.3 - Exemplo ilustrativo das rotas possíveis sem recurso aos 3 depósitos .....	45
Figura 4.4 - Rotas ótimas v1, v2 e v3.....	48
Figura 4.5 - Rota número 4 gerada para segunda-feira .....	60
Figura 5.1- Possível questão a introduzir no formulário de inscrição na Re-food Almada.....	64
Figura A.1 - Exemplo de uma Árvore Branch-and-Bound.....	91
Figura E.1 - Ficheiro .dat referente ao Exemplo de Aplicação.....	95
Figura E.2 - Parâmetros no ficheiro .mod referente ao Exemplo de Aplicação.....	96
Figura E.3 - Variáveis de decisão no ficheiro.mod referente ao Exemplo de Aplicação.....	96
Figura E.4 - Função Objetivo no ficheiro.mod referente ao Exemplo de Aplicação.....	97
Figura E.5 - Restrições no ficheiro.mod referente ao Exemplo de Aplicação.....	97
Figura E.6 - Restrições no ficheiro.mod referente ao Exemplo de Aplicação (cont.).....	98
Figura E.7 - Pós-Processamento dos dados no ficheiro.mod referente ao Exemplo de Aplicação.....	98
Figura E.8 - Pós-Processamento dos dados no ficheiro.dat referente ao Exemplo de Aplicação .....	98
Figura G.1 - Rota1 de segunda-feira.....	102
Figura G.2 - Rota2 de segunda-feira.....	103

Figura G.3 - Rota3 de segunda-feira.....	103
Figura G.4 - Rota4 de segunda-feira.....	104
Figura G.5 - Rota5 de segunda-feira.....	104
Figura G.6 - Rota6 de segunda-feira.....	105
Figura G.7 - Rota7 de segunda-feira.....	106
Figura G.8 - Rota8 de segunda-feira.....	107
Figura G.9 - Rota9 de segunda-feira.....	107
Figura G.10 - Rota10 de segunda-feira.....	108
Figura H.1 - Ficheiro .mod referente ao Exemplo de Aplicação no PAG.....	114
Figura H.2 - Ficheiro .dat referente ao Exemplo de Aplicação no PAG.....	114

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Taxionomia para VRP.....	15
Tabela 3.1 - Técnicas utilizadas para garantir a qualidade do estudo de caso.....	27
Tabela 3.2 - Fontes de Informação Primária .....	29
Tabela 3.3 - Número de rotas e voluntários por dia de semana em fevereiro de 2020.....	33
Tabela 4.1 - Resumo dos modelos VRPTW desenvolvidos.....	44
Tabela 4.2 – Distâncias entre dois vértices de um arco (i, j) em quilómetros .....	46
Tabela 4.3 - Tempos para percorrer um arco (i, j) em decimal .....	46
Tabela 4.4 - Janelas horárias nos doadores e nos depósitos, em decimal.....	47
Tabela 4.5 - Valor da constante M definida entre dois vértices .....	47
Tabela 4.6 - Hora de chegada, <i>sik</i> , segundo o OpenSolver .....	48
Tabela 4.7 - Hora de chegada, <i>sik</i> segundo o CPLEX.....	50
Tabela 4.8 - Número de veículos e doadores em cada dia de recolhas .....	51
Tabela 4.9 - Resumo dos testes computacionais a realizar.....	52
Tabela 4.10 - Resultados obtidos pelo CPLEX para o VRPTW2 com duração de rota $\leq 2h$ .....	53
Tabela 4.11 - Resultados obtidos pelo CPLEX para o VRPTW <sub>1</sub> com duração de rota $\leq 1h$ .....	54
Tabela 4.12 - Resultados obtidos pelo CPLEX para o VRPTW <sub>1</sub> com duração de rota $\leq 2h$ .....	55
Tabela 4.13 - Resultados obtidos pelo CPLEX para o VRPTW4 com duração de rota $\leq 1h$ e duração de rota $\leq 2h$ .....	57
Tabela 4.14 - Resultados obtidos pelo CPLEX para o VRPTW <sub>4</sub> com duração de rota $\leq 1h$ e alteração do parâmetro "probing" .....	57
Tabela 4.15 - Resultados obtidos pelo CPLEX para o VRPTW <sub>3</sub> com duração de rota $\leq 1h$ e duração de rota $\leq 2h$ .....	58
Tabela 4.16 - Valores obtidos para as rotas selecionadas a implementar na Re-food Almada .....	61
Tabela 4.17 - Diminuição no número de rotas na Re-food Almada.....	62
Tabela 5.1 - Informações referentes às Rotas do Exemplo de Aplicação .....	66
Tabela 5.2 - Disponibilidade e Preferência de cada voluntário referente ao Exemplo de Aplicação....	67
Tabela 5.3 - Parâmetros $r_{uf}$ com valor 1 para o Exemplo de Aplicação .....	68
Tabela 5.4 - Afetação dos voluntários às rotas referentes ao Exemplo de Aplicação com a ferramenta OpenSolver.....	69
Tabela 5.5 - Turno horário a que pertence cada rota da segunda-feira .....	70
Tabela 5.6 - Dados gerados aleatoriamente de voluntários inscritos no dia de segunda-feira .....	71

Tabela 5.7 - Matriz das rotas possíveis de realizar por cada voluntário.....	72
Tabela 5.8 - Matriz das rotas possíveis de realizar por cada voluntário com alteração no Vol4 .....	73
Tabela 5.9 - Matriz de preferências de acordo com as preferências dos voluntário inscritos na segunda-feira.....	73
Tabela 5.10 – Afetação dos voluntários às rotas reestruturadas.....	75
Tabela F.1 - Distâncias entre vértices com 8 doadores no domingo .....	99
Tabela F.2 - Janelas horárias para 8 doadores e depósitos no domingo.....	99
Tabela F.3 - Tempo a percorrer entre vértices com 8 doadores no domingo .....	100
Tabela F.4 - Constante M entre vértices com 8 doadores no domingo .....	100

## Abreviaturas, Acrónimos e Símbolos

B&B – Algoritmo *Branch-and-Bound*

CO – Centro de Operações

CPLEX – *Software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*

CVRP – Problema de Roteamento de Veículos Capacitado

DVRP – Problema de Roteamento de Veículos com Restrição de Distância

FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura

GAP – Valor percentual definido pelo CPLEX

MDVRP – Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos

ONG – Organizações Sem Fins Lucrativos

PA – Problema de Afetação

PAG – Problema de Afetação Generalizado

PLI – Programação Linear Inteira

PLIM – Programação Linear Inteira Mista

PVRP – Problema de Roteamento de Veículos Periódico

QGIS – Sistema de Informação Geográfica de acesso livre e código aberto

VRP – Problema de Roteamento de Veículos

VRPB – Problema de Roteamento de Veículos considerando *backhauls*

VRSPD – Problema de Roteamento de Veículos com Recolhas e Entregas Simultâneas

VRPTW – Problema de Roteamento de Veículos com Janelas Temporais



# 1. Introdução

Neste capítulo será apresentado o contexto em que se tem desenvolvido a atividade de uma organização sem fins lucrativos portuguesa que diariamente combate o desperdício alimentar, nomeadamente será descrito o problema referente à afetação de recursos humanos com que a mesma se debate.

Para além de uma breve apresentação da organização referida, será ainda explicitado o objetivo deste estudo e detalhada a metodologia a seguir.

## 1.1. Enquadramento e Apresentação do Problema

Nos dias de hoje, cerca de um terço da produção alimentar é perdida ou desperdiçada globalmente (Schanes & Stagl, 2019). Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), em 2011 esse desperdício correspondia a 1,3 biliões de toneladas por ano, número que contrasta com os 820 milhões de pessoas que passam fome diariamente (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 2011). Em Portugal, a “Fruta Feia” é uma das organizações que procura reduzir este desperdício de alimentos constante, ao qual está associado um subaproveitamento dos recursos usados na produção e simultaneamente um aumento das emissões de metano e dióxido de carbono, como resultado da decomposição dos alimentos não aproveitados (*Fruta Feia*, 2013). De acordo com o Projeto de Estudo e Reflexão sobre o Desperdício Alimentar (PERDA), estima-se que, em Portugal, em cada ano, sejam desperdiçados 1 milhão de toneladas de alimentos, um número correspondente a 17% dos alimentos produzidos para consumo humano (Batista et al., 2012).

Face a este problema, têm surgido organizações sem fins lucrativos ou organizações não governamentais (ONG) que recolhem os excedentes de alimentos provenientes de vários fornecedores, com a finalidade de redistribuí-los por associações de carácter social que apoiam diferentes formas de encaminhamento dos alimentos, combatendo a fome (Nair et al., 2018).

A doação de alimentos excedentes é um processo aleatório que varia em relação à quantidade, local e hora (Nair et al., 2017). Esta aleatoriedade faz variar o número de colaboradores necessários para que a ONG possa proceder à recolha de todos os alimentos doados.

O estudo da problemática exposta pretende dar resposta às dificuldades que uma ONG portuguesa apresenta no planeamento das recolhas de alimentos, as quais incluem a definição das rotas para recolher os alimentos doados e também a afetação dos recursos humanos a essas mesmas rotas, aspetos que são determinantes para o bom funcionamento da organização. A Re-food Almada é um projeto humanitário e totalmente voluntário que encaminha excedentes alimentares para quem precisa. Esta organização tem como foco principal combater simultaneamente o desperdício alimentar e a fome, recolhendo os excessos de alimentos de várias entidades fornecedoras de alimentos, tais como supermercados e

restaurantes. Sendo que o problema estudado neste trabalho teve como motivação a observação do modo como os voluntários eram alocados às rotas de recolha na Re-food Almada.

Vários fatores devem ser tidos em conta para que seja realizada uma gestão estratégica dos recursos humanos, permitindo que uma determinada organização alcance os seus objetivos (Nishii & Wright, 2007). Na ONG em estudo, a inexistência de um sistema de planeamento de rotas bem definido torna o processo de recolha de alimentos doados incerto, visto que cada voluntário utiliza o seu próprio veículo para efetuar as recolhas, pondo em causa a recolha dos alimentos em bom estado para consumo de quem mais necessita. O principal objetivo enfrentado é a diminuição das distâncias a percorrer pelos voluntários ou do tempo despendido por estes ao percorrer essas mesmas distâncias, como também a diminuição dos recursos humanos afetados à recolha dos desperdícios alimentares.

Na organização em estudo, a recolha do excedente alimentar é feita no dia e horário estipulado por cada entidade fornecedora de alimentos, variando de acordo com as especificidades de cada um deles. Essas entidades fornecedoras estão dispersas numa extensa área, compreendendo a zona de Almada e Costa da Caparica. Com o aumento do número de fornecedores, foi sentida uma necessidade crescente de angariar mais voluntários para realizar a recolha dos alimentos.

Perante uma organização que só funciona com o apoio de voluntários, o processo de recolha de excedentes alimentares tem-se demonstrado difícil, uma vez que as decisões de afetação de recursos humanos geralmente são tomadas de acordo com a experiência dos responsáveis por esta gestão, sem recurso a ferramentas especializadas (Yoshimura et al., 2006). Na organização em estudo, o método atualmente utilizado pressupõe que é o voluntário que se deve adaptar à rota, local e horário de recolha pré-estabelecido, levando muitas vezes a que os voluntários se vejam obrigados a fazer difíceis compromissos pessoais para poder efetuar a recolha dos alimentos na rota que lhes foi atribuída. Mais especificamente, ainda que os voluntários sejam alocados ao horário e dia que lhes é favorável, nem sempre é tido em conta o ponto de partida destes para a execução da rota. Este aspeto tem levado a que muitos voluntários efetuem a rota que lhes é atribuída poucas vezes.

Pelo exposto, fica patente que a afetação dos recursos humanos às rotas de recolha tem-se tornado uma tarefa cada vez mais complexa, havendo uma necessidade crescente de se criar uma ferramenta que auxilie os gestores a definir as rotas tendo em conta os recursos humanos disponíveis para serem alocados (Yoshimura et al., 2006).

## **1.2. Re-food Almada**

A Re-food surgiu na Freguesia de Nossa Senhora de Fátima, em Lisboa, a 9 de março de 2011, fundada por Hunter Halder, norte-americano que viu em Portugal um país para viver e criar a sua família. A crise económica de 2009 levou a que este ficasse sem fontes de rendimento, colocando-o numa situação delicada. Quando questionado pela sua filha sobre o que aconteceria às sobras das refeições familiares,

Hunter respondeu que iriam para o lixo. Mais tarde, a filha tornou a presenciar uma situação em que a comida que tinha sobrado no hotel em que trabalhava iria para o lixo sem que ninguém sentisse remorsos. Após essa situação, a filha de Hunter Halder chegou a casa frustrada com a insensibilidade a que assistiu. Nessa noite o seu pai criou o primeiro esboço da Re-food (*Re-food*, 2013a).

O projeto iniciou-se com a iniciativa de Hunter de percorrer os estabelecimentos do seu bairro na tentativa de recolher os excedentes alimentares diários, para que os pudesse entregar às famílias que este identificava como tendo dificuldade em aceder a refeições. Inicialmente, a Re-food tinha o centro de operações (CO) na sala de estar de Hunter, na Freguesia de Nossa Senhora de Fátima. Com o crescimento dos pedidos de ajuda e o aumento do número de fornecedores disponíveis para doar alimentos, a sede passou para um anexo da igreja da freguesia, local onde ainda se encontra atualmente. Após um mês da fundação deste projeto, a Re-food já contava com 30 voluntários e 30 fornecedores de alimentos excedentes. Decorridos 30 meses, houve um largo aumento para 500 voluntários, 100 fornecedores e mais de 500 beneficiários (*Re-food*, 2013a).

A Re-food Almada foi fundada a 6 de Outubro de 2013, contando a partir de 2016 com um CO, montado com o apoio da Câmara Municipal de Almada e sediado no Feijó (*Re-food*, 2013b). Este núcleo da Re-food tem crescido rapidamente, contando em janeiro de 2020 com vários fornecedores de alimentos e um grande número de voluntários e beneficiários, como demonstrado na Figura 1.1.



Figura 1.1 - Re-food Almada em janeiro 2020  
(<https://www.facebook.com/almada.refood/>, 2020)

A Re-food que se tem vindo a descrever continua a sobreviver dos apoios dos fornecedores parceiros, assim como do apoio de todos os voluntários que dela fazem parte. Todos os alimentos recolhidos através das rotas de recolha são preparados e embalados no CO, sendo posteriormente entregues a beneficiários que se deslocam ao CO para os recolher.

A Re-food Almada é dividida em diversas áreas: Coordenação, Voluntários, Comunidade (Beneficiários, Operações, Apoio à Comunidade), Financeira, Comunicação e Fontes de Alimento. Cada área é gerida por um ou vários gestores, também estes voluntários.

Apenas com a presença dos voluntários, com o seu crescimento e com uma boa gestão dos mesmos, a Re-food Almada poderá continuar a crescer.

### **1.3. Objetivos e Abordagem Metodológica**

Esta dissertação procura contribuir para minimizar a dificuldade que a Re-food Almada apresenta na otimização das rotas de recolha de alimentos. De modo a propor uma solução para o problema em estudo, primeiramente será realizada uma reestruturação das rotas de recolha de alimentos, tendo em conta as localizações dos pontos de partida, as localizações das entidades fornecedoras de alimentos, bem como os dias e janelas horárias em que podem ser recolhidas as doações.

O Problema de Roteamento de Veículos com Janelas Temporais foi utilizado como suporte teórico para o desenvolvimento de um modelo que permitisse otimizar as rotas a serem percorridas pelos voluntários. Mais especificamente, foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira mista com o objetivo de dar resposta ao problema acima.

Além do problema anterior, para dar resposta ao problema referente à afetação dos voluntários às rotas reestruturadas, foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira baseado no Problema de Afetação Generalizado. A afetação pretende maximizar as preferências dos voluntários no que diz respeito ao ponto de partida das rotas, tendo em consideração o número de rotas que cada voluntário pode realizar.

Os modelos de programação linear desenvolvidos serão implementados através da ferramenta *OpenSolver* do *Excel* e através do *software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.10*. Ambos os modelos passarão por uma validação recorrendo a exemplos práticos baseados no caso real.

Considerando os objetivos a atingir, foi estabelecida uma metodologia de trabalho adequada à resolução do problema apresentado na dissertação. Essa metodologia é constituída pelas seguintes etapas:

- i. Tomada de conhecimento sobre o problema enfrentado pelo estudo de caso e recolha de dados;
- ii. Revisão da literatura incidente nos temas em que a ONG está envolvida, assim como nos temas que darão resposta ao problema a resolver;

- iii. Desenvolvimento do modelo de programação linear inteira mista e do modelo de programação linear inteira;
- iv. Familiarização com o software *ILOG CPLEX Optimization Studio 12.10*;
- v. Implementação e validação dos modelos desenvolvidos;
- vi. Aplicação dos modelos à resolução do Problema de Roteamento de Veículos com Janelas Temporais e do Problema de Afetação Generalizado, no contexto do caso real, apresentando os resultados dos testes computacionais;
- vii. Escrita da dissertação.

#### **1.4. Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos.

No presente capítulo foi feita uma breve descrição do enquadramento e apresentação do problema a resolver, seguido de uma introdução à ONG em estudo. O objetivo e as metodologias a implementar também se encontram neste capítulo.

O Capítulo 2 é dedicado a uma breve revisão da literatura naquela que é a envolvente da ONG: desperdício alimentar, logística inversa e economia circular na indústria alimentar. Nesse contexto, são revistos os Problemas de Roteamento de Veículos, em particular o Problema de Roteamento de Veículos com Janelas Temporais, dado que as entidades fornecedoras de alimentos apresentam janelas temporais para ser efetuada a recolha. Terminando o capítulo, é feita uma revisão da literatura referente ao Problema de Afetação de Recursos Humanos, com foco no Problema de Afetação Generalizado.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia do estudo de caso e as fontes de informação utilizadas para recolher os dados necessários à resolução do problema apresentado pela ONG. Os mecanismos atualmente utilizados para construir as rotas de recolha de alimentos, bem como a forma de afetação dos recursos humanos a essas mesmas rotas, serão descritos neste capítulo.

No Capítulo 4, o Problema de Roteamento de Veículos com Janelas Temporais é aplicado ao caso específico da Re-food Almada, através de um modelo de programação linear inteira mista. O *software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio* é utilizado na implementação do modelo. É ainda analisado um exemplo de aplicação com o objetivo de validar a implementação feita. Assim, para além da análise dos resultados obtidos com o CPLEX, o mesmo exemplo é implementado na ferramenta *OpenSolver* do *Excel* e os resultados comparados. Finalizando o capítulo, são apresentados os testes computacionais realizados, seguidos de uma discussão dos mesmos.

O Capítulo 5 está dedicado ao Problema de Afetação Generalizado, o qual é utilizado para dar resposta a uma afetação mais eficiente dos voluntários, no contexto do caso real, através da implementação de

um modelo de programação linear inteira. O modelo é validado através da ferramenta *OpenSolver* do *Excel* e através do *software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*, com recurso a um exemplo de aplicação. Seguidamente, são expostos os testes computacionais realizados para o problema em estudo, concluindo com a discussão dos resultados obtidos.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho realizado, sendo também apresentadas sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros.

## **2. Estado de Arte**

Neste segundo capítulo apresentar-se-á o estado da arte, no que diz respeito ao problema a abordar. Primeiramente, será feita uma breve revisão da literatura relacionada com o foco da ONG: o resgate de alimentos, evitando o seu desperdício, e o combate à fome. Será realçada a importância da ONG, as suas preocupações e objetivos a nível da recuperação de alimentos. Será ainda revisto o tema da logística inversa e a sua importância como pilar na problemática do reaproveitamento de alimentos, assim como o conceito de economia circular. De seguida, será apresentada uma revisão da literatura em otimização de rotas, mais propriamente nos problemas de roteamento de veículos e no problema de afetação de recursos humanos. Será descrito com maior detalhe o Problema de Roteamento de Veículos com Janelas Temporais, uma variante do Problema de Roteamento de Veículos com especial relevância na presente dissertação. Por fim, será revisto o Problema de Afetação de Recursos Humanos, com maior ênfase no Problema de Afetação Generalizado, um dos ingredientes fundamentais utilizados na resposta que será dada ao problema apresentado pela organização.

### **2.1. Desperdício Alimentar e o Papel das ONG**

O conceito de ONG surgiu nos Estados Unidos, com o objetivo de fornecer serviços que nem o setor público nem o setor privado poderiam fornecer. Estas organizações apoiam causas de interesse público sem fins lucrativos, nomeadamente nas áreas da solidariedade, das bolsas de estudo e do meio ambiente (Liao & Huang, 2016). A crescente insatisfação da população com a incapacidade dos governos de criar bem-estar social, o rápido desenvolvimento económico e as mudanças sociais, levaram ao crescimento das ONG (Liao & Huang, 2016). Nos países desenvolvidos e em desenvolvimento, as ONG executam o seu trabalho em total colaboração com comunidades locais (Jemaa et al., 2018). Alcançar objetivos sociais, como a diminuição da insegurança alimentar, é uma das metas de inúmeras ONG, sendo possível alcançá-la através do apoio de doações e trabalho voluntário nas comunidades, redistribuindo os alimentos indesejados ou não vendidos em favor de pessoas carenciadas (Weaver et al., 2019). A redistribuição de alimentos é considerada um método de baixo custo que reduz a diferença entre a perda de alimentos e a insegurança alimentar. Esta abordagem diminui o desperdício de alimentos, aumentando a sua disponibilidade para quem mais precisa ao mesmo tempo que se minimiza o uso dos recursos naturais, como a água e energia (Mousa & Freeland-Graves, 2017).

As ONG para além de enfrentarem o desafio de corresponder às necessidades da comunidade, devem também considerar as necessidades dos doadores e voluntários, bem como as necessidades da sua própria organização (Weaver et al., 2019). O desempenho de uma ONG é, em grande parte, uma construção social (Conaty & Robbins, 2018), servindo como mecanismo para o envolvimento e participação ativa de várias pessoas da comunidade (Weaver et al., 2019). Assim, os recursos humanos, isto é, a mão de obra que possui conhecimento, habilidade e experiência na organização constituem um

fator principal para a gestão destas organizações (Barros & Nunes, 2008). No entanto, pouco se sabe sobre a influência das práticas dos recursos humanos nas ONG (Liao & Huang, 2016).

O desempenho da gestão numa ONG não afeta apenas a sua sobrevivência, mas também as suas doações (Liao & Huang, 2016). Normalmente, a responsabilidade de gerir as ONG está nas mãos do conselho administrativo, o qual determina a sua missão e propósito e garante que todos os recursos são utilizados de forma eficaz (Attouni & Mustaffa, 2014; Jemaa et al., 2018).

Como referido anteriormente, a Re-food, a ONG que está no centro do estudo efetuado neste trabalho, é uma organização de resgate de alimentos que tem como objetivo ajudar no combate contra a fome, recolhendo o excedente de alimentos de diferentes doadores, encaminhando-o para pessoas carenciadas (Nair et al., 2017) e evitando que toneladas de alimentos tenham como destino o lixo.

De acordo com Stenmarck et al. (2016) aproximadamente 88 milhões de toneladas de desperdício alimentar são geradas somente pelos países da União Europeia por ano, correspondendo a sensivelmente 173 quilogramas de desperdício de alimentos por pessoa. Esta estimativa engloba os alimentos comestíveis e partes não comestíveis associadas aos alimentos.

O desperdício de alimentos ocorre em todas as etapas da cadeia de abastecimento alimentar, desde a fase de cultivo até ao consumo pelo cliente final (Principato, 2018). Estima-se que 72% do desperdício alimentar na União Europeia ocorre na fase de produção e de consumo de alimentos. Dos 28% restantes, 12% corresponde aos desperdícios nos estabelecimentos de restauração, 10% na fase de produção primária e ainda 5% acomoda os desperdícios gerados nas áreas do retalho (Stenmarck et al., 2016).

O desperdício de alimentos pode ser dividido em três categorias, segundo (Ilakovac et al., 2020): desperdício evitável, potencialmente evitável e inevitável. Na última categoria referida, entram os resíduos de alimentos que são descartados independentemente da sua origem, como cascas de frutos do mar (Filimonau & Gherbin, 2017). O desperdício de alimentos evitável e possivelmente evitável é caracterizado por comportamentos irresponsáveis do consumidor. Os alimentos ou partes destes que podiam ter sido consumidas se tivessem sido mais bem repartidas, geridas ou armazenadas antes de terem sido descartadas constituem exemplos destes tipos de desperdício. As más práticas de gestão estão igualmente ligadas a este tipo de desperdício (Filimonau & Gherbin, 2017; Principato, 2018).

O desperdício de alimentos inevitáveis não pode ser modificado, porém as quantidades de alimentos incluídos nas outras duas categorias de desperdícios podem ser significativamente reduzidas (Ilakovac et al., 2020). A União Europeia ambiciona uma redução de 30% de desperdício alimentar até 2025 (Giordano et al., 2020).

Segundo a FAO, o desperdício de alimentos diz respeito à redução da quantidade e qualidade dos alimentos resultantes das decisões dos retalhistas e dos consumidores. São consideradas diversas razões pelas quais os alimentos são desperdiçados (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 2011): alimentos que se encontram próximos ou estão no término da data de validade, são descartados

pelos retalhistas e pelos consumidores; produtos frescos que não ficam uniformes no que toca à sua forma, cor ou tamanho, sendo removidos da cadeia de abastecimento por não apresentarem a conformidade estabelecida; alimentos comestíveis saudáveis que não sendo usados, são descartados após alguns dias nas cozinhas domésticas ou estabelecimentos de restauração.

O aumento da população mundial e as mudanças de hábitos alimentares têm-se apresentado como possíveis razões para um aumento dos desperdícios de alimentos (Awasthi et al., 2020). Esta questão global tem atraído a atenção dos especialistas à medida que aumentam os problemas de segurança alimentar bem como, os problemas ambientais e económicos que com ela estão relacionados (Amirudin & Gim, 2019). Associado ao desperdício alimentar estão perdas desnecessárias e indesejáveis de água, energia, terra e de todos os recursos necessários durante a fase de produção (van Geffen et al., 2020). Estima-se que cerca de 3,3 biliões de toneladas de gases de efeitos de estufa libertadas estejam associados ao desperdício de alimentos (Bravi et al., 2020).

Para além das questões ambientais atrás mencionadas, a problemática do desperdício alimentar é considerada também uma questão social e ética num mundo com uma crescente insegurança alimentar (Ribeiro et al., 2019). Segundo (Bravi et al., 2020), 870 milhões de pessoas sofrem de desnutrição crónica a nível mundial, pelo que o desperdício de alimentos poderia ser usado para combater o problema da fome mundial. Teigiserova et al. (2020), apresentaram mais um facto: 921.000 pessoas, ou seja, o equivalente a toda a população de Fiji em 2019, poderiam ser alimentadas anualmente com os desperdícios de alimentos evitáveis gerados na Austrália. Como é destacado em van der Werf et al. (2020), a responsabilidade pessoal dos consumidores individuais e dos retalhistas alimentares está na base da prevenção do desperdício alimentar. Enquanto isso, os consumidores demonstram uma preocupação crescente com os desperdícios de alimentos nos estabelecimentos de retalho, levando a que os retalhistas reduzam o desperdício de alimentos, alcançando uma perspetiva de responsabilidade social corporativa (Cicatiello & Franco, 2020).

Nas principais causas para a existência de resíduos alimentares em lojas de retalho estão embalagens danificadas, excesso de *stock* e alimentos classificados abaixo do ideal para os clientes. Cicatiello & Franco (2020) verificaram que a categoria de alimentos que mais contribui para o desperdício de alimentos nestas lojas são as frutas, verduras e produtos de panificação.

Tendo em conta a rotatividade na análise da taxa de desperdício, verifica-se que os produtos mais desperdiçados são aqueles que apresentam maior valor agregado, como prontos a comer e frutos do mar. Os produtos abaixo das conformidades desejadas têm três destinos possíveis: serem descartados; serem colocados em prateleiras destinadas a artigos a vender com desconto; serem doados a instituições de caridade (Cicatiello & Franco, 2020).

Nos países desenvolvidos produz-se comida suficiente para os seus habitantes e ainda para o resto dos habitantes do mundo. Não obstante, milhões de pessoas vivem com uma segurança alimentar baixa o

que leva a que as ONG de resgate de alimentos surjam cada vez em maior número (Nair et al., 2017). Através destas organizações, o elevado excedente alimentar que ocorre na área do retalho e nos serviços de alimentação e que seria descartado, é salvo e reaproveitado para consumo humano (Schanes & Stagl, 2019).

## **2.2. Logística Inversa e Economia Circular na Indústria Alimentar**

Como foi referido, o desperdício de alimentos representa uma perda significativa de recursos investidos na produção, transporte e armazenamento, além de gerar impactos ambientais consideráveis. Assim, torna-se vantajoso projetar uma gestão da cadeia de abastecimento inversa neste contexto, em parceria com ONG, de modo a criar uma alternativa para os desperdícios que ainda se encontram adequados para consumo (Bottani et al., 2019).

A transformação das cadeias de abastecimento tradicionais em cadeias de abastecimento inversas tem usualmente o intuito de minimizar os desperdícios e incentivar a redução do uso excessivo de materiais de primeira utilização, ainda que a logística inversa seja mais complexa devido às incertezas associadas à quantidade e qualidade do produto a ser recuperado (Bottani et al., 2019; Mokhtar et al., 2019).

O aumento da atenção por parte do cliente para questões ambientais incentivou as empresas a redirecionarem o seu foco para produtos sustentáveis, concentrando-se na otimização de todo o processo produtivo tendo como um dos principais objetivos a minimização da pegada ecológica (Dondo & Méndez, 2016). Além disso, a legislação ambiental incentiva os fabricantes a investir nos processos de logística inversa, de modo a diminuir a necessidade de utilização dos recursos naturais e também do acesso aos aterros (Taleizadeh & Sadeghi, 2019).

O conceito de Logística Inversa não é sempre definido da mesma forma. Pode considerar-se a Logística Inversa como a recolha e transporte de produtos e embalagens usadas (Dat et al., 2012). No entanto, Van Engeland et al. (2020) considera logística inversa como o processo de planear, implementar e controlar de forma eficaz e eficiente o fluxo de matérias-primas, produtos em vias de fabrico, produtos acabados e informações relacionadas, desde o ponto de consumo ao ponto de origem, de modo a recuperar ou criar valor adequado. Contudo, entregas incorretas, produtos com embalagem danificada e peças de reposição não utilizadas também são exemplos de fluxos inversos de produtos.

Para que um sistema de logística inversa possa ser posto em prática em cenários de desperdício de alimentos, é necessário determinar quais as rotas que os veículos devem executar para recuperar os alimentos desperdiçados de estabelecimentos alimentares e de retalho. O número de instalações de recuperação de alimentos e a sua localização devem ser projetados de tal forma que o custo total deste processo seja o mínimo (Bottani et al., 2019).

Um dos objetivos da gestão da cadeia de abastecimento inversa é a realização da gestão dos produtos ou resíduos após a sua vida útil. Com o aumento dos níveis de resíduos surgiram as preocupações ambientais, que consequentemente levaram à criação de legislações que obrigam os produtores e

fornecedores a responsabilizar-se pelos seus produtos em fim de vida. Os produtos alimentares tendem a criar resíduos num menor espaço de tempo, visto que se deterioram mais facilmente (Iqbal et al., 2020). Nos países com um elevado rendimento, a maioria dos resíduos alimentares é proveniente dos consumidores, enquanto que nos países de baixo rendimento, a maioria dos alimentos passam a resíduos no início da cadeia de abastecimento, durante a produção (Goodman-Smith et al., 2020).

Para garantir uma implementação eficaz da gestão da cadeia de abastecimento inversa, todas as partes interessadas na cadeia de abastecimento, devem assumir a responsabilidade de analisar e pôr em prática medidas que alcancem uma logística inversa (Mokhtar et al., 2019). Com o aumento da reputação cooperativa, as empresas têm investido gradualmente em mecanismos de logística inversa de modo a participarem na gestão de resíduos (Van Engeland et al., 2020).

A cadeia de abastecimento inversa pode ser vista como uma das maneiras mais importantes de implementar as práticas da economia circular num nível interorganizacional (Mokhtar et al., 2019). De acordo com a Comissão Europeia, a economia circular tem como objetivo manter “o valor dos produtos, materiais e recursos durante o maior tempo possível e simultaneamente minimizar a quantidade de resíduos gerados” (*euFood*, 2019).

Toda a sequência de processos desde a plantação até à comercialização e consumo por parte do cliente, fazem parte da cadeia de abastecimento alimentar. A etapa de processar e empacotar os alimentos, assim como todos os resíduos gerados durante a produção alimentar representam as maiores perdas, ou seja, a maior geração de resíduos ao longo da cadeia de abastecimento. No entanto, os desperdícios alimentares evitáveis encontram-se maioritariamente associados às fases de distribuição, *marketing* e consumo. Estes desperdícios devem ser minimizados tanto quanto possível, contudo quando o mesmo não é alcançável deve ser procurada uma gestão eficaz e sustentável que traga à cadeia de abastecimento benefícios ambientais (Ingrao et al., 2018).

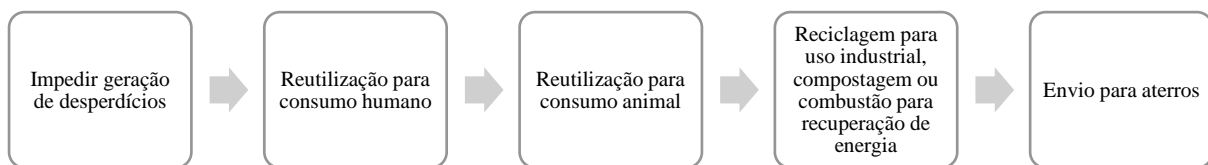
A economia circular vem reforçar a importância de minimizar os desperdícios (incluindo os desperdícios alimentares) e reduzir a utilização excessiva de recursos, transformando-os em novos componentes/recursos que podem ser usados como novos *inputs* para a fabricação ou matérias primas que podem ser usadas para outros fins, como por exemplo ração animal (Ingrao et al., 2018; Principato et al., 2019).

No contexto da economia circular não se pretende apenas melhorar a sustentabilidade ambiental, mas também melhorar o desempenho da cadeia de abastecimento inversa, melhorando a gestão dos produtos em fim de vida e subprodutos intermediários através da reutilização, reciclagem e refabrico (Mokhtar et al., 2019). Pretende-se concretamente que o valor dos produtos, materiais e recursos seja mantido na economia pelo maior tempo possível (Van Engeland et al., 2020).

Uma nova abordagem, centrada no conceito de economia circular poderá modificar os processos de produção com a finalidade de satisfazer as necessidades dos consumidores através de processos novos

e mais sustentáveis. Num contexto alimentar, o foco é a recuperação e reutilização de materiais desperdiçados ao longo da cadeia de abastecimento. Seguindo esta abordagem, os excessos de resíduos gerados nas produções agrícolas podem ser evitados, prevenindo os problemas de sustentabilidade originados pela elevada produção. Em muitas produções agrícolas, os excessos de resíduos podem levar a graves problemas de sustentabilidade devido à elevada produção por tempo indeterminado (Coderoni & Perito, 2020).

Gerir e minimizar os desperdícios alimentares de acordo com a estrutura da economia circular, tem por base uma hierarquia, proposta pelo Departamento de Agricultura dos EUA sendo esta apresentada na Figura 2.1. Esta hierarquia consiste em cinco etapas: (1) deve ser impedida a geração de desperdícios; (2) os desperdícios devem ser reutilizados, em primeiro lugar, para consumo humano; (3) os desperdícios devem ser reutilizados para a alimentação animal; (4) deve ser promovida a reciclagem para uso industrial, digestão anaeróbica, compostagem e combustão para recuperação de energia; (5) por fim, como última opção, desperdícios alimentares devem ser enviados para aterros. Ainda que sejam implementadas medidas de prevenção, nem todos os resíduos desperdiçados são evitáveis. Os desperdícios de alimentos inevitáveis devem ser reutilizados e/ou reciclados para a produção de energia renovável, por exemplo (Mousa & Freeland-Graves, 2017; Principato et al., 2019).



*Figura 2.1 - Hierarquia segundo a Economia Circular para gestão de desperdícios de alimentares  
Adaptada de (Mousa & Freeland-Graves, 2017; Principato et al., 2019)*

Do ponto de vista económico, é um facto que a economia circular veio redefinir novas condições para a gestão de resíduos de alimentos (e para outros tipos de resíduos), criando oportunidades de negócio. Neste contexto, a União Europeia implementou medidas de ação que vão ao encontro dos conceitos explicitados na hierarquia da economia circular, com o objetivo de reduzir para metade os desperdícios de alimentos *per capita* nos retalhistas e consumidores e ainda reduzir as perdas de alimentos nas cadeias de abastecimento alimentares até 2030 (Teigiserova et al., 2020).

A correta e sustentável implementação das práticas de gestão de desperdícios alimentares, estabelecidas de acordo com a hierarquia e as abordagens da economia circular, poderão ajudar as empresas a dar uma segunda vida aos desperdícios e perdas de alimentos, podendo também usá-los como matéria-prima e/ou na recuperação de energia (Principato et al., 2019).

Em suma, economia circular e logística inversa têm um foco semelhante, visto que ambos se preocupam com aspetos económicos e ambientais. No entanto, o conceito de economia circular é mais amplo do

que o de logística inversa, pois não abrange apenas o sentido inverso, mas também o sentido linear de uma cadeia de abastecimento (Dev et al., 2020).

### **2.3. Problema de Roteamento de Veículos**

O desperdício de alimentos é um assunto globalmente crítico que requer controlo para que possa ser minimizado. No entanto, e em alguns casos, o desperdício de alimentos torna-se difícil de eliminar levando ao surgimento das ONG de resgate de alimentos (Alhindi et al., 2020). A recolha de alimentos por parte destas organizações, nos estabelecimentos dos fornecedores parceiros, é normalmente feita sem conhecimento prévio da quantidade e tipo de alimentos a serem doados. Para atenuar esta incerteza, a oferta dos fornecedores pode ser estimada a partir de dados históricos, usando técnicas de previsão adequadas (Nair et al., 2018). Idealmente, os fornecedores devem comunicar à organização com antecedência a quantidade de alimentos esperada na doação, facilitando a organização interna da ONG aquando das operações de recolha (Nair et al., 2016).

As organizações de recuperação de alimentos recolhem toneladas de alimentos excedentes em cada semana, provenientes de fornecedores diferentes, incluindo supermercados, cafés, pequenos vendedores e restaurantes (Nair et al., 2016). Enquanto alguns dos fornecedores de alimentos doam alimentos uma vez por semana, outros doam várias vezes por semana, dependendo do tipo e dimensão do fornecedor. Desta diferença em termos de quantidade e frequência semanal surge a necessidade de construir um sistema eficiente e abrangente que auxilie a coordenação da recolha de alimentos desperdiçados. Este sistema deve ser capaz de, simultaneamente, minimizar o tempo de recolha, utilizar o menor número de motoristas e evitar desperdícios adicionais de alimentos (Alhindi et al., 2020).

Tendo em conta o problema associado às rotas de recolha com que as ONG se deparam e a necessidade de o conseguir resolver, em 1959 Dantzig e Ramser, introduziram o Problema de Roteamento de Veículos (*Vehicle Routing Problem* ou VRP), propondo a primeira programação matemática e abordagem algorítmica que facilitava a entrega de gasolina às estações de serviço. Os investigadores acabaram por descrever o problema como um problema generalizado do *Traveling Salesman Problem* (TSP), conhecido em Portugal como o Problema do Caixeiro Viajante (Dantzig & Ramser, 1959). Passados 5 anos, Clarke e Wright propuseram uma heurística eficaz que veio aperfeiçoar a abordagem de Dantzig e Ramser (Toth & Vigo, 2002).

O VRP é uma família geral de problemas de otimização que engloba problemas de otimização no setor da logística, transporte e distribuição (Masłowski et al., 2019). A resolução deste tipo de problemas passa pela implementação de técnicas de planeamento de rotas. No problema geral de VRP, as técnicas de planeamento de rotas de veículos visam definir um conjunto de rotas com o menor custo associado, obedecendo aos seguintes princípios/critérios: cada veículo inicia e termina a sua rota no depósito central, cada cliente é visitado exatamente uma vez por um veículo e a capacidade dos veículos não pode

ser excedida. Todos os veículos devem ter as mesmas características e só devem executar uma rota (Braekers et al., 2016; Erdoğan, 2017).

Um objetivo base do VRP é encontrar rotas ideais para entrega ou recolha de mercadoria, que iniciem/terminem num ou vários depósitos, viajando para várias cidades ou clientes, enquanto são satisfeitas as restrições impostas. No contexto de vida real, distribuições de mercadoria, recolha do lixo doméstico, distribuição de gasolina, percursos dos limpa-neve e entrega de correspondência são exemplos de contextos nos quais o VRP é normalmente aplicado (Liong et al., 2008).

O uso de rotas de veículos eficientes fornece a vantagem de reduzir o tempo e o esforço na utilização de veículos nas recolhas de excedentes alimentares, nos vários fornecedores dispersos geograficamente (Alhindi et al., 2020).

A maior parte da literatura sobre VRP considera como objetivo principal o custo associado ao planeamento das rotas, contudo, não tem em conta todos os critérios e métricas relevantes de desempenho que surgem em contexto real (Vidal et al., 2019).

Há mais de sessenta anos que o VRP tem vindo a ser objeto de estudo e categorizado de acordo com as restrições que devem ser cumpridas, a frota disponível, os objetivos estabelecidos, a estrutura da rota pretendida e o horizonte de planeamento a considerar (Drexl, 2012). Tendo em vista as variações que o VRP pode sofrer, diversos autores propuseram taxionomias para classificar as variações e alterações de acordo com uma abordagem sistemática. A mais recente e mais completa taxionomia está representada na Tabela 2.1, tendo sido publicada por Eksioglu et al. (2009).

As características e pressupostos de cada classe do VRP podem variar amplamente de um contexto para outro. Os objetivos estabelecidos devem sempre ir ao encontro do que se pretende determinar, sendo definidas múltiplas restrições que por vezes se podem tornar conflituosas entre si (Dotoli & Epicoco, 2017). Consequentemente, um número considerável de variantes do VRP foi estudado, incluindo o VRP periódico (PVRP); o VRP com janelas de tempo (VRPTW); o VRP considerando *backhauls* (VRPB); o VRP com restrição de distância (DVRP); o VRP com múltiplos depósitos (MDVRP); o VRP com recolhas e entregas simultâneas (VRPSPD), entre outros. A hierarquia das variantes do VRP segundo Chen & Yang (2017), é ilustrada na Figura 2.2.

Como o VRP é um problema *NP*-difícil, isto é um problema que se suspeita que, num certo sentido, não pode ser resolvido em tempo polinomial, o aumento da complexidade decorrente do aumento do número de variáveis consideradas leva muitas vezes à impossibilidade de determinar uma solução ótima em tempo razoável. Para estes problemas na maioria das vezes é aconselhada a procura de soluções que podendo não ser ótimas sejam o mais próximas disso, trazendo o tempo de resolução computacional do problema para valores considerados aceitáveis. De modo a atingir esse objetivo, recorre-se a algoritmos exatos, métodos heurísticos ou meta-heurísticos (Dotoli & Epicoco, 2017).

Tabela 2.1 - Taxionomia para VRP adaptada de (Eksioglu et al., 2009)

<b>Tipo de Estudo</b>	Teórico		<b>Caraterísticas Físicas do Problema</b>	Número de instalações de carregamento e descarregamento (depósito)	- Único depósito - Múltiplo depósito
	Métodos de aplicação	- Métodos Exatos - Heurísticas - Simulação - Métodos de solução em tempo real		Tipo de janela de tempo	- Restrições nos clientes - Restrições nas vias - Restrições nos depósitos - Restrições nos motoristas/veículos
	Implementação documentada			Número de veículos	- Exatamente $n$ veículos - Até $n$ veículos - Ilimitado
<b>Caraterísticas do Cenário</b>	Levantamento, revisão ou meta-pesquisa		Consideração de capacidade	- Veículos capacitados - Veículos não capacitados	
	Número de paragens na rota	- Conhecido (determinístico) - Parcialmente conhecido, parcialmente probabilístico	Homogeneidade dos veículos (capacidade)	- Veículos similares - Veículos carregam tipos de carga específicos - Veículos heterógenos - Clientes devem ser visitados por um tipo específico de veículo	
	Restrições de divisão de carga	- Divisão permitida - Divisão não permitida	Tempo de viagem	- Determinístico - Dependente do horário atual - Estocástico - Desconhecido	
	Tipo de procura do cliente	- Determinística - Estocástica - Desconhecida	Objetivo	- Dependente do tempo de viagem - Dependente da distância - Dependente do veículo - Dependente da operação - Em função do atraso - Relacionado ao risco associado	
	Quantidade de requisições de novos clientes	- Determinística - Estocástica - Desconhecida	<b>Caraterísticas da Informação</b>	Evolução da informação	- Estática - Parcialmente dinâmica
	Tempo de espera e de serviço no local	- Determinística - Dependente - Estocástica - Desconhecida		Qualidade da informação	- Determinístico - Estocástico - Previsão - Desconhecido (tempo real)
	Estrutura da janela de tempo	- Janela de tempo restrita - Janela de tempo flexível - Ambas		Disponibilidade da informação	- Local - Global
	<b>Caraterísticas Físicas do Problema</b>	Horizonte de tempo	- Períodos simples - Períodos múltiplos	Processamento da informação	- Centralizado - Descentralizado
		Restrições nos arcos ou nos nós	- Precedência e restrições de agrupamento - Restrições de subconjunto - Permitido refazer rota	Dados usados	- Dados do mundo real - Dados sintéticos - Combinado (real e sintético)
		Esquema de rede de transporte	- Rede direcionada - Rede não direcionada	Não utilizam dados	
Localização dos clientes		- Clientes nos nós - Instâncias do arco de roteamento			
Localização geográfica dos clientes		- Urbana (dispersa com padrão) - Rural (dispersa aleatoriamente) - Combinado			
	Número de origens	- Única origem - Múltiplas origens			

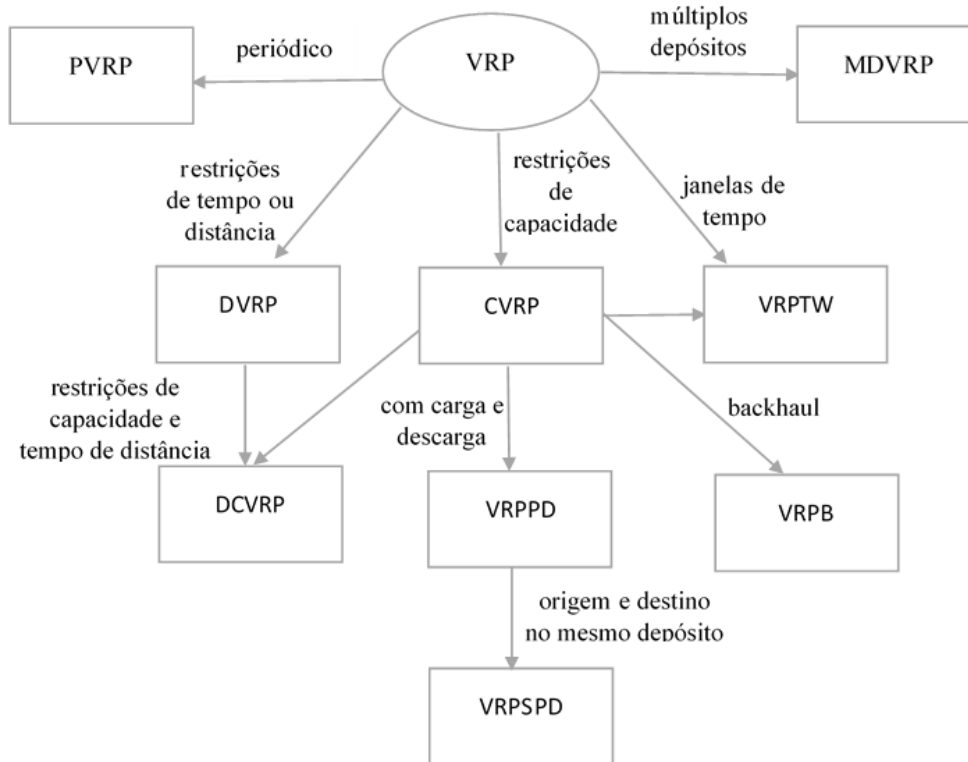


Figura 2.2 - Variantes do VRP.  
Adaptado de Chen & Yang (2017)

Em instâncias mais pequenas dos problemas, normalmente, recorre-se a algoritmos exatos eficientes que, apesar de apresentarem um custo de processamento elevado, permitem a obtenção de uma solução que se tem a certeza de ser ótima (Dotoli & Epicoco, 2017). Toth e Vigo, mencionaram em 2002 que “as maiores instâncias de VRP que podem ser resolvidas com recurso aos algoritmos exatos mais eficientes, até ao momento, contêm 50 clientes, sendo que problemas maiores podem ser resolvidos otimamente apenas em casos especiais” (Toth & Vigo, 2002). Passados 12 anos observou-se um aumento de 50 para 200 clientes, se se tiver em consideração o tamanho das instâncias possíveis de resolver consistentemente (Daniele Vigo & Paolo Toth, 2014).

Quando os algoritmos exatos apresentam um custo de processamento demasiado elevado, é necessário recorrer a métodos que nos permitam obter soluções próximas das soluções ótimas. Com a finalidade de se obter uma solução próxima da solução desejada recorre-se muitas vezes a heurísticas, as quais apresentam muitas vezes um caminho mais viável pelo facto de diminuírem a complexidade do problema. Este procedimento é maioritariamente usado em problemas de contexto real (Dotoli & Epicoco, 2017). No VRP, as famílias de heurísticas podem ser classificadas em duas classes: as heurísticas clássicas, desenvolvidas entre 1960 e 1990, e as meta-heurísticas, que tiveram o seu crescimento na antepenúltima década (Laporte et al., 2000). Como referido, as heurísticas não oferecem uma garantia de otimização, contudo ultrapassam as limitações apresentadas pelos algoritmos exatos, encontrando soluções próximas do pretendido num curto espaço de tempo (Drexler, 2012).

Segundo Laporte et al. (2000), as heurísticas clássicas podem ser divididas em três categorias:

- Heurísticas construtivas, que geram uma solução inicial viável, tendo em conta os custos da solução, no entanto, não contêm uma fase de melhoria propriamente dita;
- Heurísticas de duas fases, que são decompostas em dois componentes naturais: agrupamentos de vértices em possíveis rotas e construção da rota ótima, sendo possível repetir estes dois processos;
- Heurísticas de melhoria, as quais, por um processo iterativo, tentam melhorar a solução, recorrendo a uma sequência de trocas de vértices ou arestas, dentro de uma rota ou entre as rotas.

A maior parte das heurísticas utilizadas para o planeamento de rotas no VRP aplicam-se em grande parte quando existem problemas de restrição de capacidade nos veículos e, normalmente, em casos em que é imposto um limite ao comprimento das rotas que se procuram (Laporte et al., 2000).

Meta-heurísticas são definidas como procedimentos que exploram o espaço da solução obtida para identificar melhores soluções, incorporando heurísticas de construção e de melhoria da rota padrão. Os métodos geralmente utilizados combinam regras sofisticadas de pesquisa na vizinhança, recombinações de soluções e estruturas de memória. A qualidade das soluções produzidas por esses métodos normalmente é superior à obtida pelas heurísticas clássicas, contudo o tempo de computação é bastante superior (Gendreau et al., 2000; Laporte et al., 2000).

O número de métodos introduzidos na literatura académica para resolver diferentes variantes do VRP tem crescido rapidamente nas últimas décadas. Além disso, a capacidade de memória e a velocidade de processamento dos computadores tem aumentado exponencialmente, possibilitando resolver instâncias maiores do VRP, o que estimula o desenvolvimento de *softwares* comerciais para o VRP (Braekers et al., 2016).

De acordo com Silva Melo & Ferreira Filho (2001), recorrer a *softwares* para solucionar modelos matemáticos no desenvolvimento dos problemas de roteamento, torna-se mais eficiente que métodos manuais. Os *softwares* são sistemas computacionais que utilizam algoritmos e bases de dados, apresentando resultados satisfatórios, com um menor tempo e esforço no processamento.

### **2.3.1. Problema de Roteamento de Veículos com Janelas Temporais**

O desenvolvimento de algoritmos, isto é, a descrição do procedimento passo a passo para a resolução do problema, nomeadamente para problemas da vida real, tem tido um especial foco por parte dos investigadores que se dedicam à Investigação Operacional e têm interesse em VRP. A dimensão dos problemas resolvidos tem vindo a aumentar e as restrições práticas deixaram de ser ignoradas. Uma dessas restrições é a especificação de janelas de tempo, ou seja, intervalos de tempo durante os quais o

serviço deve ser executado (Savelsbergh, 1992). As janelas de tempo podem ser definidas para clientes, depósitos, veículos ou até mesmo para estradas (Blazewicz et al., 2007).

O problema de roteamento de veículos com janelas de tempo (VRPTW) especifica que os clientes devem ser atendidos dentro de uma janela de tempo  $[a_i, b_i]$ , sendo que  $a_i$  representa o instante mais cedo em que o cliente pode ser atendido e  $b_i$  o instante mais tarde para dar início ao atendimento. Geralmente, o objetivo é projetar rotas de menor custo para uma frota de veículos idênticos capacitados de modo a atender clientes geograficamente dispersos, dentro de janelas de tempo pré-estabelecidas. Cada cliente deve ser visitado uma vez por um veículo, e a procura desejada deve ser atendida pelo veículo, não excedendo a capacidade deste (Jepsen et al., 2007; Pardalos & Migdalas, 2018). A variante VRPTW é caracterizada por possuir um único depósito central ao qual todos os veículos devem retornar após visitar os clientes. No entanto, nos problemas da vida real é comum dividir o depósito num depósito inicial e de destino, fazendo com que as rotas de veículos deixem de ser circuitos, passando a ser caminhos desde o depósito inicial até ao depósito de destino (Kallehauge, 2008). Os depósitos, normalmente, também possuem uma janela de tempo que restringe o período de toda a atividade (Yang, 2018).

As janelas de tempo, que conferem uma complexidade adicional a esta generalização do VRP, podem ser divididas em dois tipos de janelas de tempo. Se as janelas de tempo forem restritas, o veículo deve aguardar caso chegue antes do limite inferior da janela horária ( $a_i$ ) definida pelo cliente, não sendo permitido que o veículo chegue após o limite superior da janela horária ( $b_i$ ) estipulada para iniciar o serviço. Caso as janelas de tempo sejam flexíveis, são aceites violações das restrições da janela horária, no entanto é necessário pagar um preço pela falha cometida (Desrosiers et al., 1995; Kallehauge, 2008).

Exemplos específicos de problemas com janelas de tempo restritas são as entregas bancárias, entregas de correios, entregas de restaurantes, recolha de lixo industrial e roteamento dos autocarros escolares. Entre os problemas de janela de tempo flexível, um exemplo importante são os problemas de *dial-a-ride*, como os serviços de táxis (Bräysy & Gendreau, 2005; Desrosiers et al., 1995; El-Sherbeny, 2010).

O VRPTW geralmente possui vários objetivos. Por exemplo, o objetivo de determinar o número mínimo de rotas de veículos e a sequência ideal de clientes a visitar por cada veículo, para que todos os clientes sejam atendidos e todas as restrições impostas pela capacidade do veículo e janelas de tempo sejam respeitadas. Normalmente, uma ordem hierárquica de objetivos é seguida. Isto é, o número de rotas é minimizado e, em seguida, para o mesmo número de rotas de veículos, o tempo total de viagem ou a distância total de viagem efetuada pela frota de veículos é minimizada. Outro possível objetivo do VRPTW é a minimização do tempo total gasto (incluindo o tempo de espera do veículo) (Gendreau & Tarantilis, 2010).

Avanços significativos foram obtidos para diferentes variantes do VRPTW, como as de Solomon & Desrosiers (1988) e Desrochers et al. (1988) que impulsionaram a investigação sobre este assunto e consequentemente o desenvolvimentos nesta temática.

O VRPTW é uma extensão do problema de roteamento de veículos capacitado (CVRP), como está ilustrado na Figura 2.2. O CVRP é similar ao VRPTW, excluindo a imposição de que cada cliente deve ser visitado dentro de um intervalo de tempo especificado, ou seja, quando  $a_i = 0$  e  $b_i = \infty$  para cada cliente  $i$  (Baldacci et al., 2012). Esta extensão do CVRP tem sido amplamente pesquisada nos últimos anos sendo certamente a variante mais estudada do VRP (Gan et al., 2012). Uma razão para essa forte pesquisa é a sua natureza dupla, uma vez que este é considerado um problema de duas fases. A primeira fase corresponde ao roteamento dos veículos, enquanto que a segunda fase diz respeito ao planejamento para com o cliente. A sua adaptação às aplicações do mundo real fez com que esta variante do VRP se tenha tornado mais popular entre os investigadores. Na grande maioria das cadeias de distribuição, os clientes estão sujeitos a restrições temporais, as quais precisam de ser obedecidas, pelo que o VRPTW encaixa-se perfeitamente neste tipo de situação do dia a dia (Yang, 2018).

Cada cliente é atendido exatamente por um veículo dentro da janela de tempo definida, pelo que, como o VRP é *NP*-difícil, por consequente, o VRPTW também é *NP*-difícil, no qual somente instâncias pequenas e médias podem ser resolvidas dentro de tempos de computação aceitáveis por meio de métodos de solução exata (Schneider, 2016). Por consequente, a pesquisa relacionada com o VRPTW concentrou-se maioritariamente em heurísticas. Não obstante, quando se está perante uma janela de tempo suficientemente restrita, as instâncias de tamanho real podem ser resolvidas por meio de técnicas de programação matemática (Cordeau et al., 2007).

Sendo uma variante do VRP, as abordagens mais conhecidas para resolver os problemas de VRPTW são os métodos exatos, heurísticas e meta-heurísticas (Yang, 2018).

Os métodos exatos atuais são bastante eficientes, podendo resolver instâncias com até 100 clientes (Mejía & Velasco, 2012). Segundo Larsen (1999), o primeiro artigo a propor um algoritmo exato para resolver o VRPTW, foi publicado em 1987. Desde então, foram publicados vários artigos e quase todos os algoritmos usam um dos três princípios a seguir designados (El-Sherbeny, 2010):

- Programação Dinâmica;
- Relaxação Lagrangeana;
- Geração de colunas.

Os principais métodos exatos utilizados para resolver o VRPTW, que normalmente têm por base um dos princípios anteriormente denominados são: *Branch-and-Bound*, *Branch-and-Cut* e *Branch-and-Price*. O algoritmo *Branch-and-Bound* também designado por B&B, será abordado no capítulo seguinte.

Algoritmos sustentados em programação dinâmica têm sido utilizados para obter soluções ótimas inteiras, nomeadamente no problema do caminho mais curto com restrições de janelas horárias (Desrochers et al., 1992). Os componentes de um algoritmo de programação dinâmica são as seguintes: etapas que estão associadas a vários estados, os quais correspondem diretamente a soluções admissíveis; transições entre estados, sendo estas independentes das decisões posteriores tomadas em cada etapa;

equações recursivas que determinam o valor da função objetivo em cada estado e conseqüentemente em cada etapa (Desrochers et al., 1988).

A relaxação lagrangeana demonstrou ser bem sucedida em problemas de otimização do tamanho da frota de veículos (Desrochers et al., 1992). De acordo com Fisher et al. (1997) a combinação deste princípio e o algoritmo B&B permitem resolver problemas que envolvam até 100 cliente, tendo como finalidade encontrar os melhores limites inferiores quando se pretende minimizar a função objetivo.

Abordagens com geração de colunas foram apresentadas para a formulação da partição de conjuntos em diversas variantes do VRPTW. Seixas e Mendes (2013) referem que quando necessário, um subconjunto restrito de variáveis de decisão (com a conotação de “coluna”) é adicionado por meio da resolução do problema do caminho mais curto com janelas horárias e restrições de capacidade, usando complementarmente um algoritmo de programação dinâmica. O problema primal deve coordenar a geração de soluções em cada um dos subproblemas, ou seja, em cada uma das “colunas”. As soluções obtidas geralmente geram excelentes limites duplos que são usados num algoritmo B&B para resolver os modelos de programação linear inteira.

No caso do problema do caixeiro viajante múltiplo, o recurso a esta abordagem permite minimizar uma combinação linear do tamanho da frota com a distância total a percorrer. Uma abordagem semelhante também foi aplicada para o problema de recolha e entrega no contexto do transporte de mercadorias com fortes restrições na capacidade dos veículos (Desrochers et al., 1992).

Os métodos exatos por vezes apresentam um mau desempenho, devido ao trabalho árduo em aplicar os algoritmos, podendo ser necessário vários dias para obter soluções moderadamente decentes, mesmo para instâncias mais pequenas (El-Sherbeny, 2010). Por essa razão, existe constantemente a necessidade de desenvolver algoritmos rápidos que sejam capazes de produzir soluções de qualidade em tempos de computação curtos. Para tal, o recurso a heurísticas de construção e heurísticas de melhoria torna-se vantajoso (Cordeau et al., 2007).

As heurísticas de construção destacam-se particularmente pela ordem em que os clientes são selecionados e pelo método utilizado para definir onde o cliente deve ser inserido na rota. Em 1987, Solomon propôs várias heurísticas de inserção sequencial, denotando-se que a mais eficiente foi a denominada I1. Esta heurística consiste em selecionar primeiro o cliente mais distante do depósito, inserindo os restantes clientes um de cada vez na rota atual, tendo em consideração o cliente que maximiza a economia em cada iteração, ponderando a distância ao depósito e o custo de inserção na rota atual. Após Solomon, vários investigadores propuseram melhorias na heurística apresentada (Cordeau et al., 2007; Desrosiers et al., 1995).

As heurísticas de melhoria são aplicadas após ser conhecida uma solução para o problema. Caracterizam-se pelas trocas efetuadas em cada iteração, seja trocando subcaminhos dentro da mesma rota ou em mais do que uma, ou trocando clientes na mesma rota ou em outra. Para o VRPTW, as primeiras heurísticas

de melhoria apresentadas foram as adaptações aos mecanismos de troca 2-opt, 3-opt e Or-opt, inicialmente introduzidos para o TPS (Cordeau et al., 2007).

A maioria das pesquisas relacionadas com algoritmos aproximados para a resolução do VRPTW concentrou-se no desenvolvimento de meta-heurísticas. De entre vários métodos baseados em pesquisa local destacam-se o *Tabu Search* e o *Simulated Annealing*. Por outro lado, se o objetivo for recorrer a técnicas populacionais, as alternativas mais utilizadas são os Algoritmos Genéticos, Otimização de Colônias de Formigas e Otimização de Enxame de Partículas (Cordeau et al., 2007; Yang, 2018).

Por fim salienta-se que a avaliação de qualquer método heurístico está sujeita à comparação de vários critérios relacionados com o desempenho do algoritmo, tais como: tempo de execução, qualidade da solução, facilidade de implementação, robustez e flexibilidade (Bräysy & Gendreau, 2005). Relativamente ao tempo de execução, este deve ser sempre o menor possível, assim como a solução ótima deverá ser a melhor de todas as encontradas. O algoritmo implementado deverá ser também capaz de obter boas soluções para qualquer instância. Quanto à robustez, um algoritmo não deve ser excessivamente sensível às diferenças das características do problema, pois uma heurística robusta não deve ter um mau desempenho em nenhuma instância. Por fim, sendo os métodos heurísticos implementados para resolver problemas do mundo real, os algoritmos devem ser capazes de lidar facilmente com as alterações do modelo, quer seja nas restrições ou função objetivo (Bräysy & Gendreau, 2005).

## **2.4. Afetação de Recursos Humanos**

Afetar recursos humanos é uma decisão usualmente tomada tendo em consideração o conhecimento tácito dos responsáveis. Porém, à medida que os desafios se tornam mais complexos e as habilitações necessárias para os executar se tornam mais exigentes, existe uma crescente necessidade de introduzir sistemas de suporte lógico que auxiliem na procura da solução que melhor aloca os recursos humanos, levando à obtenção de melhores resultados (Yoshimura et al., 2006).

Esta necessidade surge nos mais variados campos do quotidiano (saúde, desporto, educação e transportes) e, conseqüentemente, está cada vez mais presente nos problemas de otimização combinatória, nas áreas de otimização e investigação operacional (Faudzi et al., 2018).

Um dos problemas mencionados é o Problema de Afetação (PA), um problema de otimização que envolve a correspondência entre os elementos de dois ou mais conjuntos, sendo fundamental alcançar o resultado mais eficiente possível. A dimensão do problema corresponde ao número de conjuntos que necessitam de ser correspondidos em cada situação específica. O PA foi introduzido pela primeira vez em 1952 por Votaw and Orden, no entanto crê-se que foi apenas em 1955 que se deu o verdadeiro início do desenvolvimento de métodos que levassem a soluções práticas, com a publicação do artigo de Kuhns sobre o método Húngaro (Pentico, 2007).

Categorizando o PA, podem ser definidos os seguintes grupos de acordo com Boonsam et al.; Degroote et al. e Pentico (2007, 2011, 2018):

- Problema de Afetação Clássico, onde se pretende interligar dois conjuntos de  $n$  elementos: um conjunto com  $n$  agentes e o outro com  $n$  tarefas que precisam de ser realizadas. Neste caso, será atribuída apenas uma tarefa a cada agente. Exemplos clássicos são a atribuição de tarefas a máquinas ou agentes a máquinas;
- Problema de Afetação Generalizado, onde cada tarefa é exclusivamente atribuída a um agente, no entanto os agentes podem realizar mais do que uma tarefa, ou seja, podem existir múltiplas tarefas por agente se este tiver capacidade de recursos para tal;
- Problema de Afetação Multi-dimensional, onde se pretende combinar os elementos de três ou mais conjuntos. Exemplo deste PA é conciliar tarefas com os agentes e as máquinas, e similarmente afetar alunos e professores a turmas e horários durante um período de tempo (este último designado na literatura como PA multi-período).

No PA Clássico, onde se pretende que um agente complete uma tarefa da forma mais eficiente possível, por exemplo, maximizando o lucro total ou minimizando o custo total envolvido. Este problema pode ser declarado em forma de matriz  $n \times n$ , normalmente denominada como matriz dos custos  $c_{uf}$ , representando o custo de afetar o trabalhador  $u$  à tarefa  $f$ . Como se está perante um problema clássico, são envolvidos  $n$  trabalhos a serem realizados por  $n$  máquinas, por exemplo. Este algoritmo é capaz de encontrar uma solução eficientemente, no entanto os recursos e as procuras a satisfazer necessitam de estar bem definidas (Moškon, 2011).

O problema de afetação generalizado (PAG) é um problema notório na programação linear inteira com diversas aplicações diretas, surgindo como subproblema em modelos de aplicação que vão desde o agendamento de tarefas e roteamento de veículos, até à localização de instalações (Murthy & Ransbotham, 2019). O PAG surgiu a primeira vez em 1975, introduzido por Ross e Soland e desde então tem-se obtido uma constante progressão na complexidade dos problemas apresentados, sendo esta também acompanhada por um aumento da eficiência na solução encontrada (Morales & Romeijn, 2005).

No PAG pressupõem-se que a cada uma das  $f$  tarefas seja atribuído exatamente um dos  $u$  agentes, sendo que  $f > u$ . Nesta circunstância tem-se em consideração que cada agente tem uma capacidade máxima de recursos, designada de  $c_u$ , que vai sendo reduzida assim que é atribuída uma tarefa ao agente. Esta atribuição envolve ainda um custo à entidade responsável, que se pretende minimizar (Degroote et al., 2018).

De acordo com Murthy & Ransbotham (2019), designando  $W = \{l, \dots, w\}$  como o conjunto dos agentes disponíveis e  $S = \{l, \dots, s\}$  como o conjunto das tarefas que precisam de ser realizadas e por consequente atribuídas aos agentes disponíveis em  $W$ . À ação que um agente  $u$  deverá realizar para concluir a tarefa

$f$  está associada um custo  $c_{uf}$ , sendo que, para que essa ação seja efetuada, um número de unidades de recurso  $a_{uf}$  são envolvidas. De notar que  $a_{uf} < c_u$  para todo  $u \in W$  e  $f \in S$ .

Formulando de seguida o PAG para programação linear inteira, segundo Murthy & Ransbotham (2019). Define-se  $y_{uf} = 1$  se a tarefa  $f$  for atribuída ao agente  $u$ , caso contrário  $y_{uf} = 0$ , tem-se que:

$$\min \sum_{u=1}^w \sum_{f=1}^s c_{uf} * y_{uf} \quad (\text{eq. 2.1})$$

Sujeito a

$$\sum_{f=1}^s a_{uf} * y_{uf} \leq c_u, \quad \forall u \in W \quad (\text{eq. 2.2})$$

$$\sum_{f=1}^w y_{uf} = 1, \quad \forall f \in S \quad (\text{eq. 2.3})$$

$$y_{uf} \in \{0, 1\} \quad \forall u \in W, f \in S \quad (\text{eq. 2.4})$$

Pretende-se minimizar o custo ao atribuir as tarefas do conjunto  $S$  aos agentes constituintes do conjunto  $W$ , de modo a que o número total de recursos necessários para completar as tarefas não seja excedido. A função objetivo representada em (2.1) retrata este mesmo objetivo.

A restrição (2.2.) impõe a capacidade disponível para cada agente  $u \in W$ , enquanto que a restrição (2.3) especifica que cada tarefa  $f \in S$  é atribuída a exatamente um agente pertencente ao conjunto  $W$ . A restrição (2.4.) define as restrições de integralidade do problema.

O problema em questão é conhecido por ser *NP*-difícil pelo que tem surgido um considerável interesse no desenvolvimento de algoritmos que resolvam grandes instâncias do PAG em tempo razoável. Normalmente os algoritmos utilizados envolvem procedimentos embutidos com esquemas de enumeração como é o caso do *Branch-and-Bound* (Murthy & Ransbotham, 2019). Este algoritmo encontra-se resumidamente descrito no Anexo A.

Segundo Thompson (2003), a afetação de recursos tem como finalidade colocar as pessoas certas, nos lugares certos, nos momentos certos. Tornando-se fundamental para as entidades empregadoras que exista um bom planeamento e uma boa gestão dos recursos humanos disponíveis que devem ser afetados aos turnos, de modo a que a procura seja satisfeita com eficácia. Face às necessidades das organizações, que se encontram em constante crescimento quer a nível da procura quer a nível da competitividade, surge a necessidade de desenvolver modelos de afetação que considerem diferentes objetivos.

De entre os problemas de afetação destaca-se o problema de planeamento de horários, onde se pretende afetar períodos de trabalho aos trabalhadores, satisfazendo a procura de mão de obra. O planeamento dos horários pode ser efetuado de três formas distintas segundo Van den Bergh et al. (2013):

- Planeamento de turnos diários – efetuado através de um horizonte temporal diário, como se verifica no planeamento horário dos *call centers*;
- Planeamento de trabalho semanal – efetuado através de um horizonte temporal semanal, considerando que a semana de trabalho operacional pode não corresponder à semana de trabalho dos recursos;
- “*Tour Scheduling*” – permite realizar um planeamento semanal, tendo em conta os turnos diários, sendo uma combinação dos problemas anteriormente referidos. De entre as situações em que se aplica este planeamento destacam-se os transportes aéreos e a hotelaria.

Em geral, os problemas de afetação pretendem garantir que todas as afetações são efetuadas de acordo com as restrições colocadas, enquanto a função objetivo é otimizada.

### **3. Estudo de Caso da Re-food Almada**

Para a realização da presente dissertação recorreu-se a um método de pesquisa denominado de estudo de caso. A metodologia aplicada ao presente estudo de caso será descrita e desenvolvida neste capítulo assim como também serão apresentados os dados recolhidos. O processo atualmente realizado na construção das rotas e na afetação dos voluntários a essas rotas são detalhados igualmente neste capítulo.

#### **3.1. Metodologia de Investigação**

O método científico fornece uma oportunidade de apresentar ideias de forma rigorosa, seguindo determinados métodos de pesquisa que conduzem o investigador a obter os resultados na sua investigação. O método de pesquisa tem como objetivo suportar os resultados obtidos durante a investigação perante a comunidade académica e empresarial. Desde que seja sob as mesmas circunstâncias, este método deve permitir que os procedimentos realizados sejam repetidos, conduzindo aos resultados apresentados de forma similar (Campomar, 1991). Os objetivos ou a finalidade que se pretende alcançar com a pesquisa irão definir o melhor método de pesquisa a implementar durante a investigação.

Com a presente dissertação pretende-se otimizar as rotas de recolha de alimentos da ONG Re-food Almada. Primeiramente, pretende-se reestruturar as rotas de forma ótima ou, caso não seja possível, alcançar uma solução possível cujo valor seja próximo do valor ótimo. Seguidamente, será feita uma análise a como afetar os voluntários de forma ótima a essas mesmas rotas. Para alcançar o objetivo atrás mencionado, realizar-se-á um estudo exploratório, isto é, deve ser realizada uma primeira aproximação ao tema de modo a desenvolver melhor o problema, visando o levantamento e conhecimento dos factos por detrás do problema, procedendo posteriormente à recolha da informação disponível. Este tipo de estudos tem como meta responder à questão “como?” e para tal é recomendado um método de pesquisa designado como estudo de caso (Yin, 2017).

O estudo de caso é um método empírico que procura investigar um fenómeno contemporâneo, isto é “o caso”, de forma a obter um conhecimento amplo e aprofundado, dentro do seu contexto real. É adequada a sua utilização quando se pretende compreender a complexidade de um ou poucos casos, como também para descrever o contexto em que dado caso ocorre (Yin, 2017).

A metodologia de um estudo de caso, retratada na Figura 3.1, tem como etapas: planear a investigação; especificar o *design* da investigação; preparar; recolher dados; analisar os dados e, por fim, partilhar os resultados.

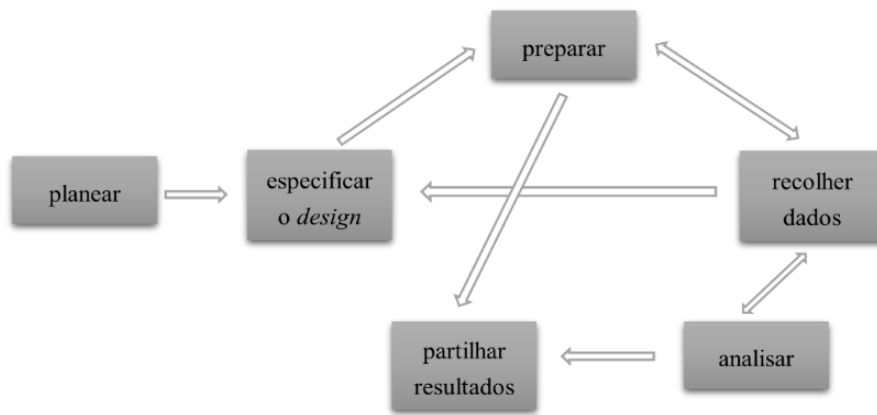


Figura 3.1 - Metodologia de um estudo de caso segundo Yin (2017)

O trabalho desenvolvido por Branski et al. (2010) representa um guia prático de como desenvolver um estudo de caso, pelo que o mesmo serviu de suporte para o desenvolvimento do presente estudo de caso. De acordo com a metodologia definida por Branski et al. e Yin (2010, 2017) foi estabelecida uma metodologia para o presente estudo de caso com seis etapas, sendo essa retratada na Figura 3.2.

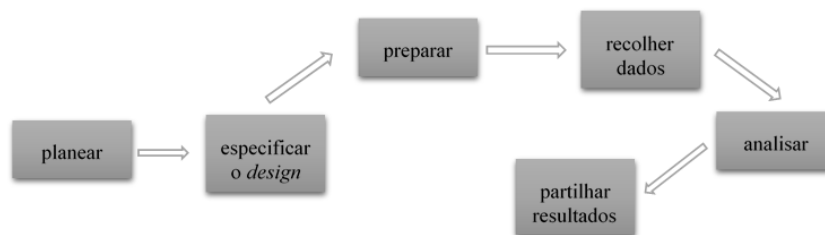


Figura 3.2 - Metodologia aplicada ao presente estudo de caso

Como planeamento da investigação é fulcral ter bem definido qual o objetivo do estudo de caso, que neste contexto é dividido em dois objetivos secundários: reestruturação das rotas na ONG e afetação dos voluntários a essas mesmas rotas. De modo a garantir que esses mesmos objetivos são atingidos, são definidas quatro questões de investigação:

- Como incluir as preferências dos voluntários no que diz respeito ao ponto de partida na definição das rotas na Re-food Almada?
- Quais são os fatores que devem ser considerados na otimização das rotas na Re-food Almada?
- A utilização de modelos de programação linear permite à Re-food Almada melhorar as suas rotas de recolha de alimentos?
- A utilização de modelos de programação linear permite à Re-food Almada otimizar as suas rotas de recolha de alimentos?

Para se atingir o objetivo proposto, foi necessário percorrer várias etapas, iniciando o estudo com um levantamento bibliográfico onde a informação recolhida que se demonstrou relevante, foi sintetizada e organizada, dando origem ao capítulo anterior: Estado de Arte.

Na especificação do *design* da investigação é fundamental que seja assegurada a qualidade do estudo de caso, garantido a sua confiabilidade e validade. Yin (2017) refere que quatro testes têm sido constantemente utilizados para estabelecer a qualidade da maioria das pesquisas sociais empíricas, sendo esses:

- Validade de Construto – estabelecer uma operacionalização correta na medição dos conceitos que estão a ser estudados, isto é, o investigador deve ser capaz de avaliar corretamente os conceitos que estão a ser implementados;
- Validade Interna – tem como objetivo estabelecer uma relação causal, em que certas condições são consideradas tendo em consideração outras condições (apenas aplicado em estudos explicativos, pouco relevante em estudos exploratórios e descritivos);
- Validade Externa – garantir que as descobertas de um estudo de caso podem ser generalizadas;
- Confiabilidade – demonstrar que as operações de um estudo podem ser repetidas, alcançando os mesmos resultados.

De modo a garantir a qualidade do estudo de caso apresentado neste documento, são utilizadas técnicas de investigação para alcançar cada teste anteriormente descrito. Na Tabela 3.1, são apresentadas essas técnicas.

*Tabela 3.1 - Técnicas utilizadas para garantir a qualidade do estudo de caso*

<b>Teste</b>	<b>Técnica Utilizada</b>	<b>Fase do Estudo de Caso em que Ocorre</b>
Validade do Construto	Utilização de múltiplas fontes de evidência (dados recolhidos em fontes primárias e secundárias).	Recolha de dados
Validade Interna	Os resultados e conclusões obtidas foram apresentadas e validadas junto dos responsáveis envolvidos no estudo.	Análise de dados
Validade Externa	Utilização da lógica da replicação em estudos de caso múltiplos.	Análise de dados
Confiabilidade	Construção do modelo PLIM baseado no modelo proposto por Desaulniers et al (2005) para reestruturar as rotas; Utilização do modelo de PLI proposto por Murthy e Ransbotham (2019) para afetar os voluntários às rotas.	Análise dos dados

Para prosseguir a especificação do *design* da investigação, o investigador deve possuir a capacidade de elaborar proposições que o encaminhem durante o desenvolvimento do estudo de caso. Estas proposições vêm ao encontro dos conceitos desenvolvidos durante o Estado de Arte e têm como função delimitar a pesquisa, de modo a compreender onde procurar evidências e recolher dados.

Parte-se do princípio de que estamos perante um VRPTW e simultaneamente perante um PAG. Assim, para conseguir resolver ambos os problemas e dar resposta às questões de investigação que suportam o objetivo, têm-se as seguintes proposições:

- Proposição 1: o VRPTW é resolvido com recurso a um modelo de Programação Linear Inteira Mista, capaz de gerar soluções onde seja minimizada a distância total percorrida pelos veículos ou minimizado o tempo total percorrido pelos veículos, aquando da realização da rota;
- Proposição 2: o PAG é resolvido com recurso a um modelo de Programação Linear Inteira que tem em consideração se um voluntário pode ser afeto a uma ou mais que uma rota.

Após as proposições, ainda dentro do *design* da investigação, foi definido o caso a estudar. O trabalho a desenvolver será apenas referente a uma organização pelo que estamos perante um único estudo de caso que inclui seis dias da semana a investigar e cada um desses dias tem o seu conjunto de dados. Para que a investigação seja possível, devem ser recolhidos e analisados dados secundários. Relativamente aos dados primários a obter, poderão ser realizadas entrevistas abertas e semiestruturadas que permitem obter um maior aprofundamento dos detalhes; questionários e também realizadas observações participativas.

Na fase da preparação e recolha de dados, foi necessário desenvolver um questionário a ser entregue a todos os voluntários participantes nas rotas de veículos. O questionário realizado encontra-se no Anexo B. Para preparar as entrevistas, foi ainda de extrema importância conhecer previamente a Re-food Almada. Assim, para obter os dados secundários, recorreu-se ao *website* e página de Facebook da mesma e também ao documento que detalha as rotas de veículos atualmente implementadas (Anexo C). Através do documento anteriormente mencionado, foi possível conhecer as localizações das entidades fornecedoras de doações e posteriormente foi possível determinar as distâncias e os tempos a percorrer entre cada um deles, através do “*My Maps*”, uma funcionalidade do *Google Maps*.

As fontes de informação primária que deram origem aos dados primários, estão detalhadas na Tabela 3.2.

As entrevistas com o responsável pela Re-food Almada e com o responsável pela gestão das rotas de recolha de alimentos, permitiram desenvolver um melhor entendimento sobre a ONG e sobre as causas que estavam na origem do problema. Em particular, permitiu compreender como eram feitas as rotas e lhes eram atribuídas as entidades fornecedoras de alimentos, denominadas de agora em diante como doadores, bem como a forma de alocação dos voluntários às referidas rotas.

A distribuição dos questionários aos voluntários foi realizada no decorrer da semana de 17 de fevereiro a 23 de fevereiro do presente ano, aquando da observação participativa. Essa recolha de informações decorreu durante todo o horário de trabalho da Re-food Almada, isto é, das 18 horas às 24 horas. A observação participativa permitiu consolidar os conhecimentos adquiridos aquando das entrevistas, compreendendo melhor todo o funcionamento da organização, para além do funcionamento das rotas. Foi também possível realizar conversas semiestruturadas com os voluntários. Estas tiveram como objetivo compreender o seu ponto de vista perante a forma como as rotas eram realizadas e ainda como estes se sentiam perante a sua afetação a uma determinada rota.

Tabela 3.2 - Fontes de Informação Primária

	Fontes de Dados	Entidade	Nº de Ocorrências
<b>Fontes de informação primária</b>	Entrevistas Abertas	Responsável pela Re-food Almada	3
	Entrevistas Abertas	Responsável pela Gestão das Rotas	2
	Conversas Semiestruturadas	Voluntários da ONG	20
	Questionários	Voluntários da ONG	60
	Observação Participativa	Investigador	6 dias (18h às 24h)

Toda a informação obtida durante a recolha dos dados primários e secundários encontra-se detalhada nas subsecções 3.2. e 3.3. deste capítulo.

Os dados reunidos serão utilizados para obter rotas para cada um dos dias de recolha e para afetar os voluntários a essas rotas, através do recurso a modelos matemáticos de programação linear, em que os *inputs* e *outputs* a fornecer a cada um deles estão interligados. A Figura 3.3 exemplifica isso mesmo. A análise a realizar, assim como a partilha dos dados, serão apresentadas ao longo do presente documento.

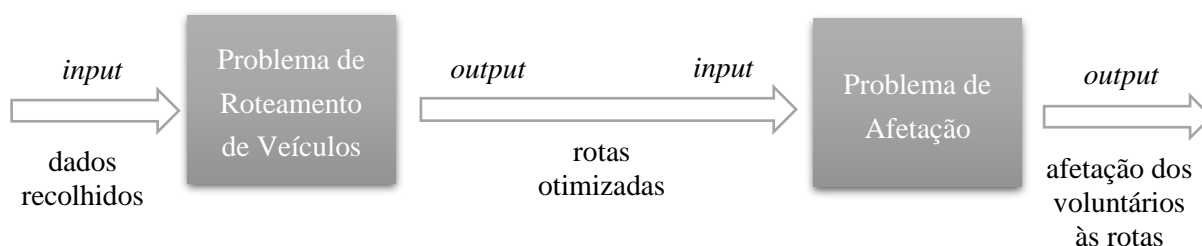


Figura 3.3 - Ligação entre os dois modelos matemáticos

### 3.2. Processo Atual da Construção de Rotas

A Re-food Almada é uma ONG que funciona a partir do trabalho voluntário da população residente no concelho de Almada. As tarefas necessárias para o funcionamento da ONG são divididas entre todos os voluntários de entre todas as áreas de trabalho, como em qualquer organização.

Para que a recolha de alimentos possa acontecer é necessário estabelecer parcerias com doadores que estejam disponíveis a doar os excedentes alimentares dos seus estabelecimentos. A área “Fontes de Alimento” tem a responsabilidade de contactar e estabelecer a parceria com os possíveis candidatos a doadores. Atualmente a ONG conta com o apoio de 35 entidades doadoras semanalmente (os doadores que procedem a doações esporádicas não serão tidos em consideração neste estudo). Aquando do contacto com o doador, quer seja supermercado, café, restaurante ou mercado, é solicitado ao

responsável pelo mesmo que informe a ONG dos dias e horários nos quais pode ser feita a recolha de alimentos. A localização e o nome dos doadores serão ocultados durante o desenvolvimento do presente documento. Na Figura 3.4, encontra-se o mapa com a sinalização dos 35 doadores (apresentada a amarelo), assim como a sinalização do CO (representada a azul), onde todas as doações recolhidas deverão ser descarregadas.

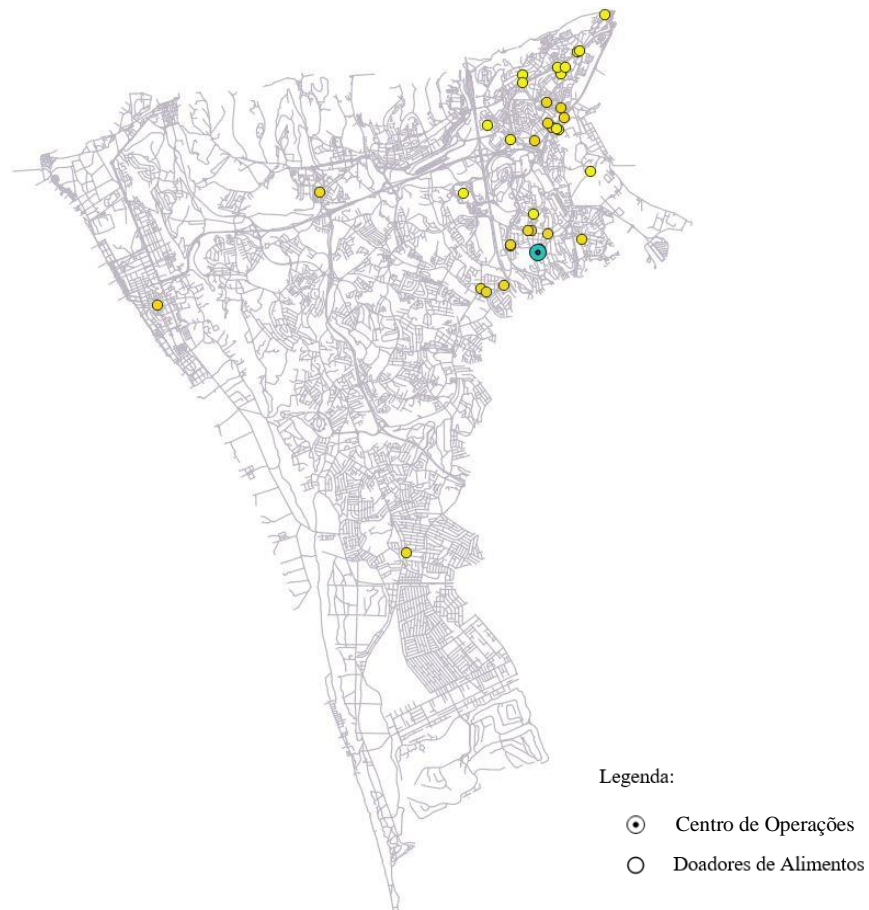


Figura 3.4 – Mapa do Concelho de Almada com a sinalização dos doadores e CO  
([https://www.qgis.org/pt\\_PT/site/about/index.html](https://www.qgis.org/pt_PT/site/about/index.html), 2020)

As sinalizações no mapa de Almada foram efetuadas através do QGIS, versão 3.10, um *software* de geoprocessamento que faz parte de um Sistema de Informação Geográfica de acesso livre e código aberto. Este *software* disponibiliza diversas funcionalidades como visualizar, gerir, editar, analisar e exportar dados de mapas. Permite também criar e personalizar os mapas e trajetos que o utilizador pretenda, facilitando o acesso à informação desejada. Após uma primeira familiarização com o *software*, foi possível inserir neste os dados referentes ao caso em estudo, isto é, todos os doadores e o depósito com a respetiva distância entre eles, obtida através do “My Maps”.

A responsabilidade de gerir e planear as rotas associadas às recolhas das doações, e consecutivamente averiguar o número de voluntários necessários para que todas as rotas possam ser executadas, cabe aos representantes ou gestores da área “Operações”. Atualmente, o planeamento das rotas é feito através do conhecimento tácito dos gestores, considerando as localizações dos doadores e a distância que estes têm

em relação ao doador mais próximo. O horário de recolha dos alimentos também é tido em conta no planeamento, definindo uma hora específica para a recolha e não janelas horárias. E ainda é tido em consideração que os veículos utilizados nas rotas são os próprios veículos dos voluntários, sendo que a cada veículo corresponde sempre um voluntário e que esse voluntário é o próprio motorista do veículo.

À data do presente estudo de caso, a Re-food Almada opera com 21 rotas de recolha diferentes, sendo que cada uma abrange entre 1 a 5 doadores de alimentos. No Anexo C é possível visualizar as rotas de veículos atualmente realizadas pelos voluntários. As rotas de recolha são efetuadas de acordo com a disponibilidade de doação dos doadores. Esta pode ser de uma ou várias vezes por semana, pelo que a regularidade de realização das rotas é igualmente definida pelos doadores. A quantidade de alimentos a doar é conhecida *à priori* através de contacto telefónico com o doador ou, alternativamente, através da previsão baseada no conhecimento tácito dos voluntários, como por exemplo no caso das grandes superfícies.

Os veículos utilizados para as recolhas partem de um ponto incógnito à organização, podendo ser o local de trabalho, habitação ou até mesmo o CO. Atualmente, o ponto de partida da rota não é tido em conta no planeamento da mesma. Os voluntários recolhem a doação, normalmente alimentos ou refeições excedentes, devendo seguir para o CO após a recolha. Assim, as rotas de veículos terminam, sempre, no CO, onde os beneficiários se devem deslocar para levantar a doação que lhes corresponde.

As rotas de veículos são orientadas de acordo com os turnos horários de trabalho da ONG. Assim, as várias rotas atuais decorrem no período entre as 18 horas e as 24 horas, sem duração máxima para cada rota definida.

De acordo com os dados primários recolhidos durante a observação participativa, as rotas de recolha de alimentos de segunda-feira a domingo, excluindo sábado, contaram com a presença de vários voluntários, havendo uma oscilação de presenças entre os dias. No sábado não são efetuadas rotas de recolha de alimentos por decisão dos doadores.

Foram inquiridos 60 voluntários durante a referente semana com o intuito de compreender se estes estariam dispostos a realizar uma rota de recolha de alimentos diferente da atual, se estariam disponíveis para realizar uma rota com mais do que um ponto de recolha e por norma, qual costuma ser o ponto de partida para iniciar a rota de recolha de doações que lhe está destinada.

Quando questionados com a possibilidade de serem alocados a uma rota de recolha de alimentos diferente da usual, dos 60 inquiridos, 40 voluntários demonstraram-se disponíveis para essa mudança. As respostas obtidas, por dia da semana, encontram-se na Figura 3.5.

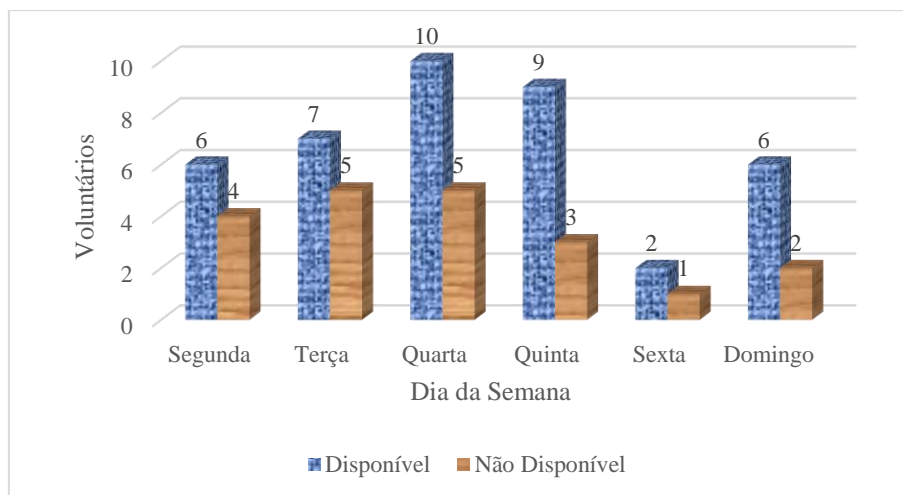


Figura 3.5 - Disponibilidade dos voluntários para serem afetados a uma rota diferente

Relativamente à questão: “Estaria disponível a visitar mais do que um doador, no decorrer da sua rota?”, aproximadamente 68% dos inquiridos respondeu de forma positiva à questão colocada. Na Figura 3.6 são especificados o número de voluntários, por dia da semana, que estariam ou não disponíveis para visitar mais do que um doador.

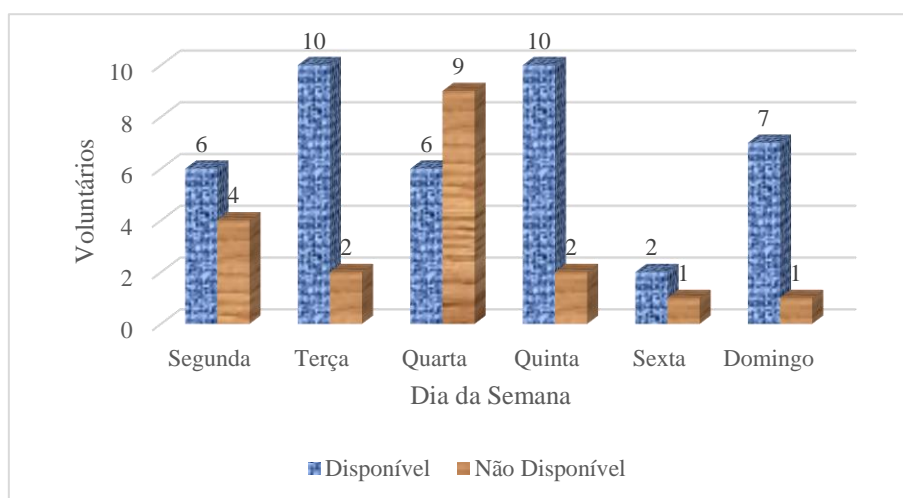


Figura 3.6 - Disponibilidade dos voluntários para visitar mais do que um doador

No decorrer do inquérito, constatou-se que aproximadamente 57% voluntários iniciam a rota de recolha de alimentos na sua habitação. Sensivelmente 27% dos inquiridos dão início à rota que lhes foi atribuída a partir do local de trabalho, enquanto que os restantes inquiridos iniciam a rota no CO. A informação referida pode ser visualizada na Figura 3.7, de acordo com cada dia da semana.

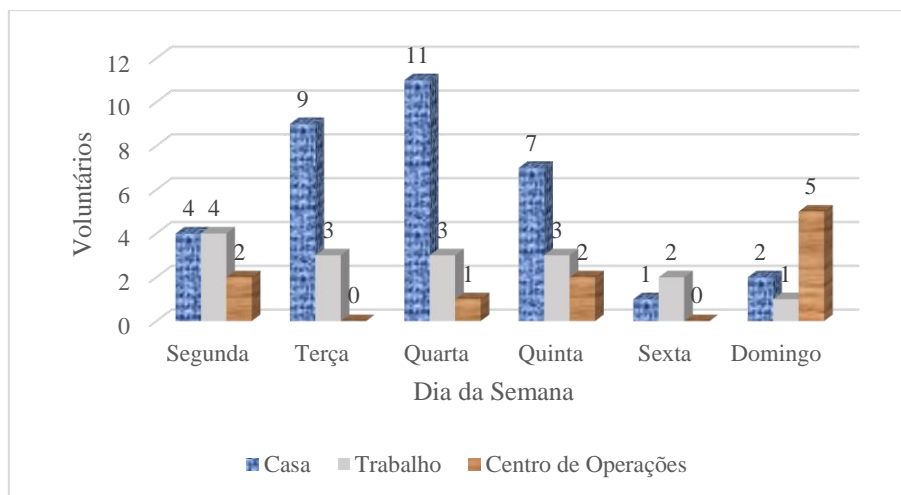


Figura 3.7 - Localização inicial da rota

Constatou-se, através da observação participativa, que os voluntários que iniciavam as rotas nas instalações da ONG, isto é o CO, o faziam pelo facto de estarem na mesmas anteriormente ou mesmo por necessitarem de caixas para recolher as doações de alimentos.

De acordo com o Anexo C e com os dados primários recolhidos e anteriormente exibidos, construiu-se a Tabela 3.3 que indica o número de rotas a serem realizadas atualmente, assim como o número de voluntários disponíveis para as realizar, em cada dia. Devido à pandemia instalada mundialmente, o número de voluntários contabilizado para colaborar na execução das rotas foi registado apenas com uma observação.

Tabela 3.3 - Número de rotas e voluntários por dia de semana em fevereiro de 2020

	Número de rotas de recolha de alimentos	Número de voluntários
Segunda-feira	13	10
Terça-feira	17	12
Quarta-feira	15	15
Quinta-feira	13	12
Sexta-feira	3	3
Domingo	13	8

Após a observação dos dados, é notória a diferença entre o número de voluntários e o número de rotas de recolha de alimentos existentes em cada dia. Atualmente, vários voluntários têm de realizar mais do que uma rota diariamente. Tal facto evidencia a necessidade de reestruturação das rotas de modo a que os voluntários necessitem apenas de executar uma só rota por dia, e não mais do que uma, e que todos os alimentos desperdiçados possam ser recolhidos e doados a famílias carenciadas ainda em condições de consumo.

Para que a reestruturação das rotas seja efetuada, é fundamental definir janelas horárias para a realização da recolha, visto que irá facilitar os voluntários na execução da rota. Atualmente, os voluntários nem sempre conseguem cumprir com a hora definida pelos doadores para recolherem as doações, pelo facto de o fluxo rodoviário em Almada ser caótico, devido ao reduzido número de ruas principais e ao elevado número de ruas de sentido único.

### **3.3. Processo Atual da Afetação dos Voluntários às Rotas**

Um voluntário que pretenda colaborar com a Re-food Almada, deverá entrar em contacto com a mesma via e-mail, sendo-lhe pedido que compareça no CO no dia e horário combinado. O CO funciona das 18 horas às 24 horas, com turnos de 2 horas cada: 18h-20h; 20h-22h e 22h-24h. Após a primeira presença do voluntário no CO, é-lhe entregue um formulário para que possa preencher com os seus dados e disponibilidade semanal (diária e horária), como pode ser visualizado pelo Anexo D.

A afetação dos voluntários em turnos, quer seja para colaborar no CO, quer seja para realizar uma rota de recolha de alimentos, é efetuada pela área “Voluntários” que tem a responsabilidade de tratar as informações fornecidas pelos voluntários.

Os recursos humanos, neste caso, os voluntários, são afetados às rotas de acordo com a necessidade verificada pelo gestor de cada rota ou verificada pelos gestores da área “Operações”. Cada rota de recolha tem um gestor específico que gere os voluntários da mesma. Aquando da necessidade verificada para alocar mais voluntários numa rota, pelo facto de o volume de alimentos doado estar tendencialmente a aumentar ou por eventuais desistências de voluntários, o gestor da rota menciona esta falta à área “Voluntários”.

É através do conhecimento tácito que os gestores responsáveis por cada rota apresentam que os mesmos alocam voluntários às rotas, de acordo com a disponibilidade que estes mencionaram. Até ao momento não é tido em consideração o ponto de partida, o número de quilómetros feitos nem o tempo despendido nas deslocações realizadas pelo voluntário para a execução da rota.

Os voluntários por vezes são afetados a rotas com um ponto de partida e percurso distante do ponto de origem em que estes pretendem iniciar a rota, levando a um desnecessário prejuízo para a vida pessoal dos voluntários. Estes referem que é necessário haver mudanças na forma como a sua afetação é feita às rotas, de modo a que sua presença enquanto voluntários de recolha seja mantida.

Além disso, nem sempre é possível contar com o apoio de voluntários para todos os dias em todas as horas desejadas, pelo que acaba por ser necessário apelar à flexibilidade dos voluntários de modo a que todas as rotas sejam realizadas. Por outro lado, a ONG pode deparar-se também com a situação de ter mais voluntários num certo dia e hora, tendo de lidar com os voluntários que não são afetados, propondo-

lhes se possível que realizem uma rota em outro dia, onde exista falta de voluntários. Ainda assim, se não lhes for possível, é sugerido aos voluntários que exerçam a sua ajuda dentro do CO.

A solução ideal passaria por afetar um voluntário apenas a uma rota para que este não ficasse sobrecarregado, e consequentemente dar a oportunidade de participar ao maior número de pessoas que desejem colaborar e contribuir para esta organização e causa.

Atualmente o voluntário pode decidir em que turno quer exercer a sua ajuda, de entre os três turnos possíveis. Contudo, como se pretende que a nova afetação dos voluntários a cada rota tenha duração máxima de uma hora, entre as 18 horas e as 24 horas, pode ocorrer que a rota necessite de ser realizada perto do término de um dos turnos, pondo em questão a disponibilidade dada pelo voluntário. Assim sendo, deverão ser disponibilizados novos turnos, similarmente com a duração de duas horas, no entanto haverá mais turnos para que um voluntário decida o que é mais vantajoso para si. Os novos turnos a atribuir são: 18h-20h; 19h-21h; 20h-22h; 21h-23h; 22h-24h. Mantém-se a duração de duas horas por turno pois neste não é só englobada a duração da rota como também engloba o tempo de deslocações do voluntário para o ponto de partida e o tempo que o voluntário despense a descarregar as doações no CO.

Aquando dos dados primários recolhidos no decorrer da semana de 17 de fevereiro a 23 de fevereiro do presente ano, inquirindo 60 voluntários, verifica-se através da Figura 3.7 que 63.3% dos inquiridos tem a sua disponibilidade fixa e 36.7% tem a disponibilidade variável. Assim, a disponibilidade dos últimos voluntários referidos pode ser ajustada, caso seja necessário, para uma melhor afetação de todos os voluntários às rotas.

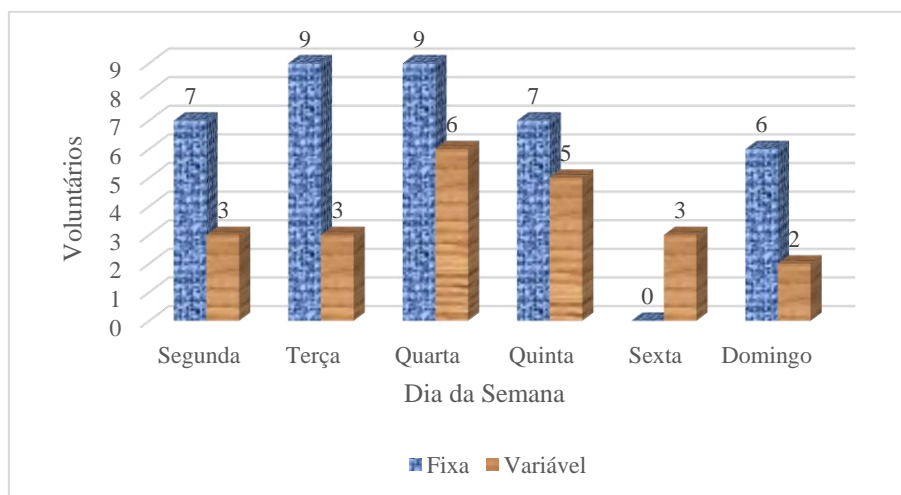


Figura 3.8 - Disponibilidade dos voluntários para colaborar com a ONG



## **4. Problema de Determinação de Rotas de Recolha de Alimentos na Re-food Almada**

No presente capítulo são apresentadas as características do problema referido pela organização, indo ao encontro da variante do VRP em estudo, o VRPTW. São descritos modelos matemáticos que serão utilizados para obter soluções para o problema, sendo posteriormente considerado um exemplo de aplicação que se implementa e valida com recurso à ferramenta *OpenSolver*. O *software* que auxiliará na determinação das rotas ótimas de recolha de alimentos será também apresentado. Por fim, são descritos e debatidos os resultados obtidos para o VRPTW no contexto do caso de estudo.

### **4.1. Introdução do VRPTW na Re-food Almada**

Otimizar as rotas na Re-food Almada envolverá duas etapas com objetivos distintos. Para que se possa dar início ao desenvolvimento da primeira etapa devem ser detalhados os fatores a considerar. Assim, devem ser considerados pontos de partida correspondentes ao início das rotas a percorrer pelos voluntários, discriminadas janelas horárias para visitar os doadores de acordo com a sua disponibilidade diária, tempos e distâncias a percorrer entre doadores e entre cada doador e pontos de partidas.

Para que uma das categorias do VRP possa ser aplicada às rotas de veículos de recolha de alimentos na ONG e possa dar-se início ao desenvolvimento da primeira etapa desta investigação, devem ser detalhadas as características e restrições a ter em consideração aquando da implementação de cada modelo.

As rotas de veículos têm em conta os horários e dias em que os doadores farão as doações, pelo que, serão definidas janelas horárias para cada doador, e não apenas uma hora específica como tem sido planeado até ao momento. Com este requisito, a variante do VRP que melhor se enquadra é o VRPTW. Esta variante é aplicada diariamente (todos os dias da semana em que há recolhas), não sendo necessário recorrer ao VRP periódico que tem em consideração um período de planeamento.

Os voluntários devem iniciar a rota de recolha em um de três pontos de partida definidos, denominados de agora em diante como depósitos. Na segunda etapa desta dissertação, estes serão novamente considerados para afetar os voluntários às rotas determinadas. O término da rota, como anteriormente mencionado, continuará a ser o CO, visto que todos os voluntários têm de obrigatoriamente descarregar neste as doações recolhidas. Assim, o problema em estudo terá três depósitos de origem e apenas um depósito de retorno. No entanto, e por ser mais real, um dos depósitos de origem será simultaneamente depósito de retorno, neste caso, o CO. A escolha dos dois restantes depósitos teve por base as rotas atualmente existentes, a localização geográfica dos doadores e as ruas pelas quais os voluntários inevitavelmente passariam ao efetuar uma rota. Na implementação computacional do caso real, serão

considerados depósitos denominados de Refood e RefoodFim (correspondente ao CO), Rotunda e Pragal (correspondentes aos outros dois depósitos).

Aos depósitos de origem e ao depósito de retorno será também associada uma janela horária que representa a hora mais cedo possível que o veículo pode partir do depósito e a hora mais tarde possível que este pode retornar para o depósito.

Na Figura 4.1. observa-se o concelho de Almada com a sinalização dos depósitos designados para o início e fim das rotas de recolha de doações (Pragal representado pela cor verde, Rotunda representado pela cor castanho e Refood/RefoodFim representado pela cor azul).

Cada doador deve ser visitado por um e apenas um dos veículos, sendo que a doação deve ser completamente recolhida nessa visita. Para efeitos de estudo, será considerado que todos os veículos têm a mesma capacidade de transporte, que a duração de cada rota não deve exceder um máximo de uma hora e que os voluntários têm sempre consigo caixas disponíveis para receber as doações caso os doadores não possuam essas caixas.

O objetivo do roteamento de veículos consiste em minimizar a distância total percorrida pelos veículos ou o tempo total despendido pelos veículos no decorrer das suas deslocações, com o intuito de se analisar as rotas obtidas em cada caso. Pretende-se restringir sempre que possível o número de voluntários/veículos necessários.



Figura 4.1 - Mapa do Concelho de Almada com identificação de doadores e depósitos ([https://www.ggis.org/pt\\_PT/site/about/index.html](https://www.ggis.org/pt_PT/site/about/index.html), 2020)

### 4.1.1. Formulação Matemática

O VRPTW pode ser abordado com recurso a vários modelos matemáticos, desde que estes integrem as características do problema em estudo. O modelo para o VRPTW a ser desenvolvido nesta dissertação foi baseado no modelo matemático proposto por Desaulniers et al. (2005). Para formular o VRPTW utilizou-se a notação seguinte:

#### Conjuntos

$A$  – Define o conjunto de todos os arcos

$D$  – Representa o conjunto de doadores

$N$  – Define o conjunto de todos os vértices

$V$  – Define uma frota de veículos homogéneos

#### Parâmetros

$a_i$  – Instante mais cedo em que o voluntário  $i$  poderá ser atendido

$b_i$  – Instante mais tarde para dar início ao atendimento do voluntário  $i$

$d_{ij}$  – Representa a distância entre dois vértices de um arco  $(i, j)$

$G$  – Representa um grafo direcionado  $(N, A)$

$M_{ij}$  – Constante definida entre vértices de um arco  $(i, j)$

$s_i$  – Define o tempo de serviço associado a cada vértice  $i$

$t_{ij}$  – Representa o tempo de viagem entre dois vértices de um arco  $(i, j)$

$i$  – Vértice inicial num arco  $(i, j)$ , representando simultaneamente o número de doadores

$j$  – Vértice final num arco  $(i, j)$

$k$  – Número de veículos disponíveis para a realização das rotas

$k_{max}$  – Número máximo de veículos disponíveis para a realização das rotas

$L$  – Representa um depósito de origem

$M$  – Representa outro depósito de origem

$R$  – Representa um depósito de origem e retorno

$T$  – Duração máxima atribuída a uma rota

## Variáveis de Decisão

$s_{ik}$  – Variável de decisão que indica a hora a que o veículo  $k$  inicia o serviço no vértice  $i$

$x_{ijk}$  – Variável de decisão binária que se define como 1 quando o arco  $(i, j)$  é percorrido pelo veículo  $k$

Após definida a notação, no caso a considerar, o VRPTW consiste numa frota de veículos homogêneos definida por  $V$  e por um conjunto de doadores  $D$ , originando um grafo direcionado  $G = (N, A)$ . Este grafo possui  $|D| + 3$  vértices: os doadores, indicados por  $1, 2, \dots, n$ , e os depósitos, representados pelos vértices  $L$  e  $M$  (depósitos de origem) e  $R$  (depósito de origem e de retorno). O conjunto constituído por todos os vértices é o conjunto  $N = \{L, M, R, 1, 2, \dots, n\}$ . O conjunto dos arcos é definido por  $A$  e representa a conexão entre os depósitos e os doadores e ainda a conexão que os doadores têm entre si:  $A = \{(i, j) : i, j \in N\}$ . A cada arco  $(i, j)$ , onde  $i \neq j$ , é associada uma distância  $d_{ij}$  e um tempo de viagem  $t_{ij}$  de  $i$  para  $j$ .

O número de veículos disponíveis,  $k$ , para percorrer os arcos  $(i, j)$ , nunca poderá exceder o máximo de veículos disponíveis,  $k_{max}$ . Para efeitos de formulação, assume-se que não existem restrições na capacidade dos veículos.

Assume-se ainda, em linha com o que sucede na realidade, que cada doador está disponível numa janela de tempo  $[a_i, b_i]$ , previamente definida. Considera-se que a janela de tempo é restrita pelo que o veículo não pode chegar depois de  $b_i$  e, se chegar antes de  $a_i$ , terá de esperar até à hora definida para ser atendido. A cada doador  $i$  é associado um tempo de serviço<sup>1</sup>  $s_i$  que não pode ultrapassar a amplitude da janela de tempo correspondente.

A mesma janela de tempo  $[H, F]$ , onde  $H$  e  $F$  representam a primeira partida possível do depósito e a última chegada possível ao depósito, é associada a cada um dos depósitos  $L, M$  e  $R$ . O tempo de serviço para os vértices em questão é considerado nulo.

Supõe-se que  $a_i, b_i$ , e  $d_{ij}$  são números reais não negativos e que  $t_{ij}$  é um número real positivo.

O modelo contém dois conjuntos de variáveis de decisão,  $x_{ijk}$  e  $s_{ik}$ . Para cada arco  $(i, j)$ , onde  $i \neq j, j \neq L, j \neq M$ , e para cada veículo  $k$ , considera-se que  $x_{ijk}$  é uma variável binária:  $x_{ijk} = 1$  se e só se na solução ótima o arco  $(i, j)$  for percorrido pelo veículo  $k$ ; caso contrário  $x_{ijk} = 0$ .

A variável de decisão  $s_{ik}$  é definida para cada vértice  $i$  e para cada veículo  $k$ , indicando a hora a que o veículo  $k$  começa a atender o doador  $i$ . Caso o veículo  $k$  em questão, não atenda o doador  $i$ ,  $s_{ik}$  não terá qualquer significado.

---

<sup>1</sup> Tempo que um doador leva para entregar a doação ao voluntário. Pode incluir o tempo de preparação da doação caso o doador não o tenha feito previamente.

Pretende-se projetar um conjunto de rotas que minimize a distância total a percorrer por cada veículo ou o tempo total despendido pelos veículos ao percorrer essas distâncias, de modo a que cada doador seja visitado apenas uma vez, sendo que cada rota tem origem no vértice  $L$ ,  $M$  ou  $R$  e termina no vértice  $R$ , tendo em consideração as janelas horárias nos doadores.

Para um VRPTW em que se pretende minimizar a distância total associada a todas as rotas, a função objetivo é definida por:

$$\min \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} x_{ijk}. \quad (\text{eq. 4.1})$$

Como restrição é necessário definir que cada doador  $i$  é visitado exatamente uma vez e apenas por um veículo  $k$ :

$$\sum_{k \in V} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1, \quad \forall i \in D, \quad (\text{eq. 4.2})$$

e que cada veículo  $k$  sai obrigatoriamente do depósito  $L$ ,  $M$  ou  $R$ :

$$\sum_{j \in D} (x_{Ljk} + x_{Mjk} + x_{Rjk}) = 1, \quad \forall k \in V. \quad (\text{eq. 4.3})$$

Além disso, é fundamental garantir que, após cada veículo  $k$  chegar a um doador e efetuar o serviço, este viaje de novo para visitar novos doadores, regressando por fim obrigatoriamente ao depósito  $R$ :

$$\sum_{i \in N} x_{ihk} - \sum_{j \in N} x_{hjk} = 0, \quad \forall h \in D, \quad \forall k \in V, \quad (\text{eq. 4.4})$$

$$\sum_{i \in D} x_{iRk} = 1, \quad \forall k \in V. \quad (\text{eq. 4.5})$$

Com o objetivo de assegurar que os tempos de chegada a doadores consecutivos são conciliáveis, é adicionada a restrição seguinte:

$$x_{ijk}(s_{ik} + s_i + t_{ij} - s_{jk}) \leq 0, \quad \forall i, j \in N, \quad \forall k \in V. \quad (\text{eq. 4.6})$$

Para garantir as janelas de tempo impostas pelos doadores e pelos depósitos, impõe-se a condição:

$$a_i \leq s_{ik} \leq b_i, \quad \forall i \in N, \quad \forall k \in V. \quad (\text{eq. 4.7})$$

Para assegurar que a duração da rota do veículo  $k$  não excede o limite  $T$ , previamente estabelecido, requerem-se as condições

$$s_{Rk} - s_{Lk} \leq T, \quad \forall k \in V \quad (\text{eq. 4.8})$$

$$s_{Rk} - s_{Mk} \leq T, \quad \forall k \in V \quad (\text{eq. 4.9})$$

$$s_{Rk} - s_{Rk} \leq T, \quad \forall k \in V. \quad (\text{eq. 4.10})$$

Por fim, consideram-se as restrições de integralidade

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \in N, \quad \forall k \in V. \quad (\text{eq. 4.11})$$

Observe-se que a restrição (4.6) garante a inexistência de subrotas, visto que para cada veículo as variáveis de início do serviço impõem uma direção exclusiva de rota. Contudo, a restrição em questão não é uma restrição linear. Posto esse facto, esta pode ser substituída por um conjunto de restrições lineares. O maior valor que  $s_{ik} + s_i + t_{ij} - s_{jk}$  assume é obtido quando  $s_{ik}$  é máximo (ou seja, quando  $s_{ik} = b_i$ ) e  $s_{jk}$  é mínimo (ou seja, quando  $s_{jk} = a_j$ ). Deste modo, definindo

$$M_{ij} = b_i + t_{ij} + s_i - a_j \quad i, j \in N,$$

garante-se que

$$M_{ij} \geq s_{ik} + s_i + t_{ij} - s_{jk}.$$

Consequentemente, a equação (4.6) pode ser substituída por

$$s_{ik} + s_i + t_{ij} - M_{ij}(1 - x_{ijk}) \leq s_{jk}, \quad \forall i, j \in N, \quad \forall k \in V, \quad (\text{eq. 4.12})$$

onde se define que se um veículo  $k$  viaja de  $i$  para  $j$ , a hora a que inicia o serviço no vértice  $j$  é igual ou superior à soma da hora em que inicia o serviço em  $i$  com o tempo de serviço em  $i$  e o tempo de viagem de  $i$  para  $j$ .

De constatar que se  $x_{ijk} = 0$ , a condição (eq. 4.12) transforma-se em

$$s_{ik} + s_i + t_{ij} - M_{ij} \leq s_{jk},$$

sendo sempre satisfeita se se tiver em consideração a definição de  $M_{ij}$ . Caso contrário, se  $x_{ijk} = 1$ , a condição (eq. 4.12) modifica-se para

$$s_{ik} + s_i + t_{ij} \leq s_{jk},$$

que coincide com a restrição (eq. 4.6).

Em suma, o modelo de VRPTW em estudo, designado por VRPTW<sub>1</sub>, é um modelo matemático de programação linear inteira mista (PLIM) caracterizado por restrições e função objetivo lineares, nomeadamente a função objetivo (eq. 4.1) e as restrições (eq. 4.2) à (eq. 4.5) e (eq. 4.7) à (eq. 4.12). Uma das variáveis de decisão é binária (a variável  $x_{ijk}$ , que indica se o veículo  $k$  percorre ou não o arco  $(i, j)$ ) e a outra variável é uma variável real não negativa (a variável  $s_{ik}$ , que corresponde à hora a que o veículo  $k$  começa a atender o doador  $i$ ).

No modelo de PLIM apresentado, tem-se como obrigatoriedade que todos os veículos disponíveis efetuem uma rota, iniciando e terminando a mesma nos depósitos pretendidos. Essa obrigação é definida pelas restrições (eq. 4.3) e (eq. 4.5). No entanto, se se pretender alterar o problema, permitindo soluções com um número de veículos igual ou inferior ao número máximo de veículos disponíveis, basta substituir as restrições (eq. 4.3) e (eq. 4.5) pelas restrições seguintes:

$$\sum_{j \in D} (x_{Ljk} + x_{Mjk} + x_{Rjk}) = \sum_{i \in D} x_{iRk}, \quad \forall k \in V, \quad (\text{eq. 4.13})$$

onde se garante que todos os veículos que saem dos depósitos  $L$ ,  $M$  e  $R$  tem de terminar a sua rota no depósito  $R$ , e

$$\sum_{i \in D} x_{iRk} \leq 1, \quad \forall k \in V, \quad (\text{eq. 4.14})$$

que garante, em vista da igualdade (eq. 4.13), que cada veículo que for necessário deve fazer uma única rota, terminado a mesma no depósito  $R$ .

Em suma, o novo modelo de VRPTW, denominado por VRPTW<sub>2</sub>, é um modelo matemático de programação linear inteira mista com função objetivo (eq. 4.1) e restrições (eq. 4.2), (eq. 4.4) e (eq. 4.7) à (eq. 4.14).

Outra variante possível do modelo considerado inicialmente, consiste em minimizar o tempo gasto pelos voluntários nos vários trajetos entre cada vértice, em vez da distância percorrida. Esta é uma opção que se pode justificar em situações em que os trajetos se realizem em ambiente citadino, onde muitas vezes o tempo despendido não é proporcional à distância a percorrer. Tal opção corresponderia a considerar a função objetivo seguinte:

$$\min \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} . \quad (\text{eq. 4.15})$$

Utilizando a função objetivo anterior e mantendo a obrigatoriedade de que todos os veículos disponíveis efetuem uma rota, obtém-se um modelo matemático de programação linear inteira mista com função objetivo (eq. 4.15) e restrições (eq. 4.2) à (eq. 4.5) e (4.7) à (eq. 4.12), designado por VRPTW<sub>3</sub>.

No entanto, se o desejado for alcançar soluções com um número de veículos igual ou inferior ao número máximo de veículos disponíveis, obtém-se um outro modelo matemático de programação linear inteira mista com a mesma função objetivo (eq. 4.15) e restrições (eq. 4.2), (eq. 4.4) e (eq. 4.7) à (eq. 4.14), denominado por VRPTW<sub>4</sub>.

De forma a resumir os modelos de PLIM desenvolvidos anteriormente foi criada a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resumo dos modelos VRPTW desenvolvidos

Modelo	Função Objetivo (o que se pretende minimizar)	Tipo de Restrição (número de veículos disponíveis)
VRPTW <sub>1</sub>	distância	$k = k_{max}$
VRPTW <sub>2</sub>	distância	$k \leq k_{max}$
VRPTW <sub>3</sub>	tempo	$k = k_{max}$
VRPTW <sub>4</sub>	tempo	$k \leq k_{max}$

#### 4.1.2. Exemplo de Aplicação do Modelo Matemático VRPTW<sub>2</sub>

Com o objetivo de averiguar se os modelos anteriormente descritos correspondem ao pretendido, foi implementado um exemplo ao modelo VRPTW<sub>2</sub>, com o recurso à ferramenta *OpenSolver* do *Excel*. Esta ferramenta é um otimizador linear, inteiro e não linear de código aberto para o *Microsoft Excel*. Não apresenta limites para o tamanho do problema a resolver, sendo admitidas tantas variáveis e restrições quanto a memória do computador permitir (*OpenSolver for Excel*, 2020). O mesmo não acontece com a ferramenta *Solver*, que apresenta um limite de 200 variáveis de decisão e ainda um limite para as restrições dependendo da forma como estas se apresentam e do tipo do modelo em questão, linear ou não linear.

Para a execução do exemplo, consideram-se três depósitos de origem (depósitos *L*, *M* e *R*) e um depósito de retorno, onde terminam as rotas dos veículos (armazém *R*), como no caso real em estudo. O depósito *R* e o armazém *R* são exatamente o mesmo, contudo para facilitar a implementação foram-lhes atribuídas designações diferentes. Considerou-se a disponibilidade de três veículos e a necessidade de serem visitados quatro doadores (Pão, Carne, Massa e Pizza).

Uma das soluções que o *OpenSolver* poderá fornecer, com o recurso aos três veículos, saindo um de cada depósito de origem e retornando os três ao armazém *R*, está exemplificada na Figura 4.2. No entanto, tendo em conta as distâncias e os veículos disponíveis e necessários, o recurso aos três depósitos de origem poderá não ser o mais proveitoso. Por exemplo, o caso retratado na Figura 4.3 poderia constituir uma alternativa melhor. De notar, que a necessidade de recorrer aos três depósitos pode não ser o mais vantajoso assim como o recurso aos três veículos. Na Figura 4.2 e 4.3, cada uma das rotas possíveis de ser realizada é representada por uma cor e seta diferente.

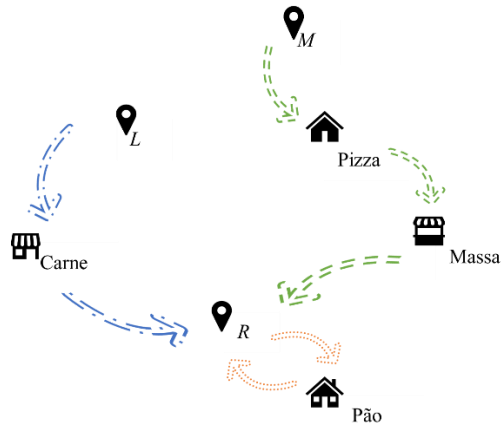


Figura 4.2 - Exemplo ilustrativo das rotas possíveis com recurso aos 3 depósitos

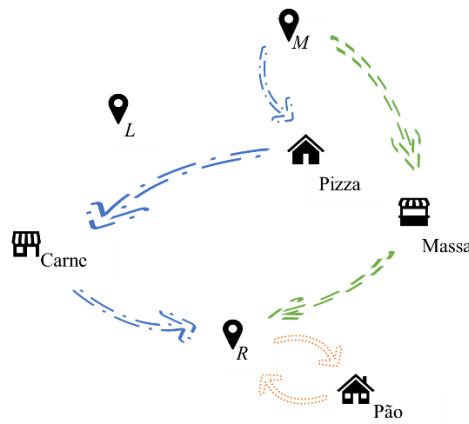


Figura 4.3 - Exemplo ilustrativo das rotas possíveis sem recurso aos 3 depósitos

A fim de concretizar o exemplo anteriormente descrito, foram fornecidos como *inputs* ao *OpenSolver*:

- As distâncias entre os vértices;
- O tempo que demora a percorrer o arco entre cada par de vértices;
- O tempo de serviço em cada doador (15 minutos);
- O tempo de serviço em cada depósito (0 minutos);
- As janelas horárias dos doadores e dos depósitos;
- Constante  $M$  definida entre os vértices;
- Tempo limite para cada rota de 1 hora.

As distâncias  $d_{ij}$  entre dois vértices de um arco  $(i, j)$  foram definidas aleatoriamente, em quilómetros, como é visível na Tabela 4.2. No entanto, e tendo em consideração as restrições do modelo em estudo, o vértice  $i$  tem que obrigatoriamente ser sempre diferente do vértice  $j$ , para que seja realizado um arco. Assim, aquando da ocorrência  $i = j$ , foi atribuída uma distância nula para que a ferramenta *OpenSolver* compreenda-se a impraticabilidade de ir de “Pão” para “Pão”, por exemplo. Uma distância nula foi também atribuída quando num arco  $(i, j)$ ,  $i$  for igual a qualquer depósito/armazém e  $j$  for igual a qualquer depósito/armazém;  $i$  for um doador e  $j$  um depósito e ainda quando  $i$  for armazém R (que nunca poderá ser) e  $j$  igual a um doador.

De notar que as linhas da tabela correspondem aos vértices  $i$  e que as colunas da tabela correspondem aos vértices  $j$ .

O tempo que um veículo  $k$  demora a percorrer a distância entre o vértice  $i$  e o vértice  $j$ , ou seja, o tempo que o veículo demora a percorrer um arco, é apresentado na Tabela 4.3. Os tempos são definidos em decimal da hora.

De modo similar ao procedimento aplicado às distâncias, foi concedido a todos os casos em que o vértice  $i$  é igual ao vértice  $j$ , algo que não é desejável, um valor de tempo nulo de modo a não induzir a ferramenta do *Excel* em erro, evitando a que esta considere mais vantajoso ir de “Carne” para “Carne” por ser mais rápido, por exemplo.

Tabela 4.2 – Distâncias entre dois vértices de um arco ( $i, j$ ) em quilómetros

$i \backslash j$	DepósitoL	DepósitoM	DepósitoR	ArmazémR	Pão	Carne	Massa	Pizza
DepósitoL					3	5	7	8
DepósitoM					4	7	6	2
DepósitoR					2	6	3	6
ArmazémR								
Pão				2		5	4	9
Carne				6	5		6	2
Massa				3	4	7		5
Pizza				6	8	2	5	

Tabela 4.3 - Tempos para percorrer um arco ( $i, j$ ) em decimal

$i \backslash j$	DepósitoL	DepósitoM	DepósitoR	ArmazémR	Pão	Carne	Massa	Pizza
DepósitoL					0,17	0,25	0,42	0,5
DepósitoM					0,2	0,42	0,33	0,08
DepósitoR					0,08	0,33	0,17	0,33
ArmazémR								
Pão				0,08		0,25	0,20	0,57
Carne				0,33	0,25		0,33	0,08
Massa				0,17	0,20	0,42		0,25
Pizza				0,33	0,50	0,08	0,25	

As janelas horárias propostas pelos doadores, assim como as janelas horárias de cada um dos depósitos são apresentadas na Tabela 4.4. As janelas horárias são exibidas em decimal da hora.

Tabela 4.4 - Janelas horárias nos doadores e nos depósitos, em decimal

i	DepósitoL	DepósitoM	DepósitoR	ArmazémR	Pão	Carne	Massa	Pizza
$a_i$	17,50	17,50	17,50	17,50	19,00	20,00	18,00	19,00
$b_i$	23,00	23,00	23,00	23,00	20,00	21,50	19,50	19,50

Os valores definidos para cada constante  $M_{ij}$  foram obtidos através da equação  $M_{ij} = b_i + t_{ij} + s_i - a_j$ . A Tabela 4.5 apresenta esses mesmos valores.

Tabela 4.5 - Valor da constante M definida entre dois vértices

i \ j	DepósitoL	DepósitoM	DepósitoR	ArmazémR	Pão	Carne	Massa	Pizza
DepósitoL					4,17	3,25	5,42	4,50
DepósitoM					4,20	3,42	5,33	4,08
DepósitoR					4,08	3,33	5,17	4,33
ArmazémR								
Pão				2,83	1,25	0,50	2,45	1,82
Carne				4,58	3,00	1,75	4,08	2,83
Massa				2,42	0,95	0,17	1,75	1,00
Pizza				2,58	1,25	-0,17	2,00	0,75

Após fornecidos todos os *inputs* necessários à ferramenta do *Excel*, foram traduzidas para a linguagem de programação as restrições do modelo e respetiva função objetivo para que este pudesse ser executado de acordo com o modelo definido em VRPTW<sub>2</sub>.

A solução ótima obtida foi a seguinte: o primeiro veículo, representado a laranja na Figura 4.4, está associado à rota  $v_1 = \langle R, P\tilde{a}o, R \rangle$ , ao segundo veículo, representado a azul na Figura 4.4, foi atribuída a rota  $v_2 = \langle L, Carne, R \rangle$ , enquanto que ao terceiro e último veículo disponível, representado a verde na Figura 4.4, foi afetado a rota  $v_3 = \langle L, Pizza, Massa, R \rangle$ . Obteve-se uma distância mínima a percorrer de 24 quilómetros, no total das três rotas, verificando-se que o recurso ao depósito M não foi necessário para se alcançar a melhor solução.

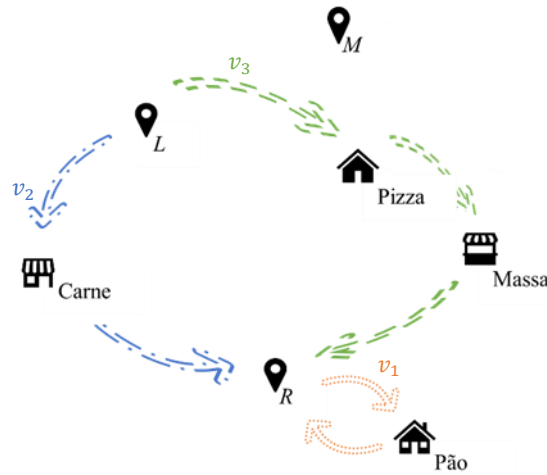


Figura 4.4 - Rotas ótimas  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$

A hora de chegada a cada depósito e a cada doador, no decorrer de cada rota, é apresentada na Tabela 4.6. A duração total de cada rota, tendo em conta o tempo de espera e o tempo de serviço em cada doador, foi de aproximadamente uma hora para o segundo e terceiro veículo, enquanto que a rota do primeiro veículo tem a duração de 43 minutos, aproximadamente.

Tabela 4.6 - Hora de chegada,  $s_{ik}$ , segundo o *OpenSolver*

	$i=L$	$i=M$	$i=R$	$i=P\tilde{a}o$	$i=Carne$	$i=Massa$	$i=Pizza$	$j=R$
<b>k=1</b>			18:42	19:00				19:25
<b>k=2</b>	19:35				20:00			20:35
<b>k=3</b>	18:56					19:30	19:00	19:55

Verifica-se que o modelo matemático descrito no presente documento para resolver o  $VRPTW_2$ , funciona como desejado. Os modelos referentes ao  $VRPTW_1$ ,  $VRPTW_3$  e  $VRPTW_4$  foram também implementados e validados através desta ferramenta, sendo possível passar para o caso real onde é fornecido um maior número de *inputs* em cada modelo.

### 4.1.3. Software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio e Exemplo de Aplicação do Modelo Matemático $VRPTW_2$

Reestruturar as rotas de veículos na Re-food Almada envolve vários parâmetros, variáveis e restrições, que se tornam demasiado extensas para recorrer à ferramenta *OpenSolver*. Posto esse facto, o recurso a esta ferramenta torna-se inviável, sendo necessária a introdução de um *software* para modelação e resolução de problemas de otimização. Recorrer a um *software* não só diminuirá o tempo de computação, como também diminuirá os erros humanos associados à inserção das restrições uma a uma.

O desenvolvimento de equipamentos mais rápidos e confiáveis, proporcionaram o desenvolvimento de sistemas mais robustos para a programação matemática. Exemplo desses sistemas é o CPLEX, criado em 1999, capaz de resolver problemas de maior dimensão (Lorena et al., 2003).

O *software CPLEX Optimization Studio* faz parte do conjunto de serviços e produtos que a empresa *International Business Machines (IBM)* disponibiliza. Acomoda um conjunto de ferramentas para modelar e resolver problemas de otimização, através de um rápido desenvolvimento e implementação de modelos de otimização de decisão usando programação matemática. Consiste num ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), com recursos completos que suporta *Optimization Programming Language (OPL)*, com um mecanismo de otimização matemática (CPLEX) e um mecanismo de programação de restrições (*CP Optimizer*) para problemas de planeamento (*IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*, 2020).

A escolha do presente *software* foi baseada no facto de este ser constantemente utilizado na resolução de problemas de programação linear, inteira e mista. Para problemas de programação linear, o sistema por norma utiliza o método *simplex* e para problemas de programação linear inteira, o algoritmo B&B. Os problemas de programação linear inteira mista habitualmente são resolvidos seguindo o mesmo método que os de programação inteira: o algoritmo B&B. Este algoritmo explora a relaxação linear e aplica o procedimento de ramificação apenas às variáveis inteiras (*OPL Language User's Manual - IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*, 2020).

De modo a compreender o *software* e as suas funcionalidades, efetuou-se primeiramente a implementação do exemplo de aplicação descrito na secção 4.1.2 pelo facto de este ser uma simplificação do caso real em estudo. Esta implementação está incluída no Anexo E do presente documento.

A versão do *software* utilizada foi a 12.10, sendo esta instalada num computador AMD Ryzen 7 3700U com processador Radeon Vega Mobile Gfx 2.30 GHz, com 12GB de memória RAM.

Recorrendo ao *software*, ao qual nos referiremos daqui em diante por CPLEX, constata-se que o modelo de PLIM desenvolvido no subcapítulo 2.2.1. é capaz de dar resposta ao VRPTW<sub>2</sub> para quatro doadores e três veículos com um tempo de computação de aproximadamente 2,30 segundos. A função objetivo apresenta um valor de 24 quilómetros, compreendendo as distâncias que os três veículos realizam entre vértices, sendo possível alcançar um GAP de 0% (note-se que o GAP é um valor percentual definido pelo CPLEX, que mede a proximidade da solução admissível encontrada comparativamente à solução ótima. Pretende-se que esta percentagem seja a menor possível, isto é 0%, para que a solução encontrada seja uma solução ótima).

Como solução ótima, o primeiro veículo está associado à rota  $v_1 = \langle R, P\tilde{a}o, R \rangle$ ; ao segundo veículo foi atribuída uma rota  $v_2 = \langle L, Carne, R \rangle$ , enquanto que ao terceiro foi afetada a rota  $v_3 = \langle L, Pizza, Massa, R \rangle$ . Verifica-se que as rotas atribuídas aos veículos são idênticas àquelas que foram

atribuídas aos veículos utilizando a ferramenta *OpenSolver*, havendo apenas discrepância na hora a visitar cada doador. As horas definidas pelo CPLEX podem ser visualizadas na Tabela 4.7. Verifica-se que o CPLEX faz uso da hora máxima disponível para a duração de uma rota.

Tabela 4.7 - Hora de chegada,  $s_{ik}$  segundo o CPLEX

	$i=L$	$i=M$	$i=R$	$i=P\tilde{a}o$	$i=Carne$	$i=Massa$	$i=Pizza$	$j=R$
<b>k=1</b>			18:19	19:00				19:19
<b>k=2</b>	21:05				21:20			22:05
<b>k=3</b>	18:55					19:30	19:00	19:55

Confirmando a validade do modelo para uma pequena instância, como é o caso do exemplo de aplicação aplicando o VRPTW<sub>2</sub>, tanto na ferramenta *OpenSolver* como no *software* CPLEX, os próximos passos baseiam-se na implementação dos modelos de VRPTW desenvolvidos no caso real em estudo. No entanto, será usado apenas o CPLEX dado o aumento significativo da dimensão do problema.

#### 4.1.4. Aplicação do VRPTW ao Caso de Estudo e Discussão dos Resultados Obtidos

Tal como referido previamente, o VRPTW é um problema NP-difícil. Pelo que, apenas instâncias pequenas e médias poderão ser resolvidas em tempos de computação aceitáveis, por meio de métodos exatos. Como mencionado anteriormente, o CPLEX recorre ao B&B que é um método exato para resolver problemas baseado em PLIM, como é o caso do VRPTW.

Na presente secção pretende-se averiguar para que instâncias do problema é possível encontrar a solução ótima de forma eficiente, utilizando os dados reais recolhidos. Simultaneamente, avaliar-se-á empiricamente a dificuldade do problema em estudo.

Cada instância a analisar do VRPTW é caracterizada por dois parâmetros: o número de doadores a visitar,  $i$ , e o número máximo de veículos disponíveis para efetuar as recolhas,  $k_{max}$ .

Em conformidade com os dados primários recolhidos, é possível saber o número de veículos disponíveis para realizar as rotas de recolha em cada dia. De referir que esse valor resulta de apenas uma observação, o que por sua vez decorreu da impossibilidade de recolher dados durante um período maior devido à pandemia mundial que se enfrenta.

O número de veículos máximo a considerar para cada dia apresenta-se na Tabela 4.8. O número de doadores a visitar em cada dia de recolha encontra-se descrito na mesma tabela.

Tabela 4.8 - Número de veículos e doadores em cada dia de recolhas

<b>Dia da Semana</b>	<b>Número Máximo de Veículos Disponíveis (<math>k_{max}</math>)</b>	<b>Número de Doadores (<math>i</math>)</b>
segunda-feira	10	22
terça-feira	12	26
quarta-feira	15	25
quinta-feira	12	25
sexta-feira	3	3
domingo	8	19

Para cada dia em que é necessário haver recolhas dos alimentos, serão efetuados diversos testes computacionais de modo a realizar uma análise de sensibilidade nos modelos desenvolvidos e compreender como as alterações efetuadas nos diferentes modelos de PLIM afetam as soluções geradas pelo CPLEX. Tendo em conta os objetivos, isto é, minimizar as distâncias percorridas pelos veículos ou minimizar os tempos percorridos por esses veículos durante o percurso da rota, serão implementados 4 modelos de VRPTW diferentes. Considerar-se-ão duas funções objetivo distintas de modo a avaliar aquela que permite obter melhores resultados.

Serão realizados dois tipos de testes para cada modelo de VRPTW desenvolvido. Primeiramente será realizado um teste em que se considera que a duração máxima de uma rota é 1 hora e seguidamente será realizado um teste em que se considera que a duração máxima de cada rota poderá ir até 2 horas. O número de doadores,  $i$ , manteve-se fixo em todos os testes realizados. A Tabela 4.9 resume os testes computacionais que foram efetuados para todos os dias em que há recolhas, cujos resultados se apresentam mais à frente nesta secção.

No caso do VRPTW<sub>1</sub>, como é visível pela Tabela 4.9, quando a duração máxima de uma rota é de 1 hora, serão efetuados testes computacionais com diferentes tempos máximos de computação. Supôs-se nesta abordagem que, ao introduzir um maior número de veículos, seria necessário um menor tempo de computação a fornecer ao *software*. Isto é, presumiu-se que ao aumentar o número de veículos, menos esforço computacional seria necessário.

Tabela 4.9 - Resumo dos testes computacionais a realizar

	Duração Rota $\leq 1$ hora		Duração Rota $\leq 2$ horas	
	Número de Veículos Disponíveis ( $k$ )	Tempo de Computação	Número de Veículos Disponíveis ( $k$ )	Tempo de Computação
VRPTW <sub>2</sub>	$k_{\max}$	10 horas	$k_{\max}$	10 horas
VRPTW <sub>1</sub>	$k_{\max}$	10 horas	$k_{\max}$	3 horas
	$k_{\max} + 2$	5 horas		
	$k_{\max} + 4$	3 horas		
	$k_{\max} + 6$	2 horas		
VRPTW <sub>4</sub>	$k_{\max}$	3 horas	$k_{\max}$	3 horas
VRPTW <sub>4</sub> (alteração do parâmetro <i>probing level</i> no CPLEX)	$k_{\max}$	3 horas	$k_{\max}$	3 horas
VRPTW <sub>3</sub>	$k_{\max}$	10 horas	$k_{\max}$	3 horas

Como *inputs* em cada instância do problema, consideram-se: a janela horária em que cada doador deve ser visitado, assim como as janelas horárias dos depósitos; a distância entre doadores e depósitos; o tempo que se demora a percorrer o trajeto entre cada doador e os depósitos, e o valor das constantes  $M_{ij}$ .

As janelas horárias de cada doador foram definidas com base no conhecimento tácito dos gestores das rotas atuais da Re-food Almada, tendo ainda sido discutidas com os doadores as melhores janelas temporais para serem efetuadas as recolhas. Relativamente às janelas horárias dos depósitos, essas foram definidas tendo em conta a hora mais cedo possível para se começar uma rota e a hora mais tarde possível para se terminar uma rota, isto é, das 18 horas às 24 horas. As distâncias e tempos entre doadores, entre cada doador e cada depósito e entre depósitos, foram obtidos através do “My Maps”, como referido anteriormente.

De forma a exemplificar como os dados foram introduzidos no *Excel* que tem ligação direta com o modelo de PLIM a ser implementado e resolvido no CPLEX, foi criado o Anexo F, o qual apresenta um excerto dos dados utilizados para o dia de domingo, de modo a que o leitor possa compreender como os dados necessários foram introduzidos.

Os modelos de PLIM anteriormente descritos neste capítulo foram implementados no *software* CPLEX usando os valores *default* em cada parâmetro.

Como, desejavelmente, se pretende que o número de veículos envolvido seja o menor possível, visto que a cada veículo está associado um voluntário e o número destes é reduzido, implementou-se em primeiro lugar o VRPTW<sub>2</sub>, em que se restringe o número de veículos necessários à realização das rotas.

Este modelo tem como objetivo minimizar a distância realizada pelos veículos no decorrer das rotas, o que vai ao encontro do interesse da Re-food Almada.

Considerando a restrição que garante que uma rota não excede o máximo de 1 hora de duração e um tempo máximo de computação de 10 horas, não foi possível obter qualquer solução em nenhum dos dias da semana, exceto para sexta-feira onde com um tempo de computação de 3,93 segundos se obteve um GAP de 0%, um valor de 33 quilómetros para a função objetivo e a necessidade de recorrer a 2 veículos para executar as rotas.

No sentido de se tentar compreender o impacto que a restrição que define a duração máxima de uma rota apresenta no desenvolvimento do modelo, realizou-se um novo teste para cada dia da semana, considerando novamente o VRPTW<sub>2</sub> e definindo que a duração máxima de cada rota poderia ir até 2 horas. O tempo de computação máximo considerado foi, também, de 10 horas. Para o dia de sexta-feira a solução foi encontrada após 3,91 segundos. Os resultados obtidos para cada dia estão representados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Resultados obtidos pelo CPLEX para o VRPTW<sub>2</sub> com duração de rota  $\leq 2h$

<b>Dia da Semana</b>	<b>Nº de Veículos Disponíveis</b>	<b>Tempo de Computação Máximo (horas)</b>	<b>Nº de Veículos Necessários</b>	<b>Função Objetivo (km)</b>	<b>GAP (%)</b>	<b>Nº Soluções Encontradas</b>
Segunda-feira	10	10	5	51,54	13,75	48
Terça-feira	12		6	57,12	21,10	33
Quarta-feira	15		6	52,20	25,00	18
Quinta-feira	12		5	51,76	21,20	32
Sexta-feira	3		1	28,00	0,00	3
Domingo	8		4	31,23	21,64	25

Verifica-se que ao realizar a alteração na restrição que diz respeito à duração máxima de uma rota, é possível obter soluções, isto é, é possível gerar rotas para cada dia da semana, onde primeiramente não era possível gerar rotas com a duração máxima de 1 hora.

De forma a compreender o comportamento do *software* relativamente ao número de veículos que se considera, foram realizados vários testes computacionais onde em cada um se força o número de veículos a ser constante. Para tal, recorreu-se ao modelo matemático VRPTW<sub>1</sub>. Em cada dia da semana foram analisadas 4 instâncias em que se alterou entre cada uma delas o número fixo de veículos a utilizar, no entanto, para sexta-feira analisou-se apenas uma instância, sendo esta justificada pelo reduzido número de veículos e doadores a visitar nesse dia. Nos testes realizados considerou-se como duração máxima de rota 1 hora. Na Tabela 4.11 estão apresentados os valores obtidos para os vários dias e, em

cada dia, para diferentes números de veículos: tempo de computação, valor da função objetivo, GAP e número de soluções inteiras encontradas pelo *software*. Após o término do tempo de computação definido, o CPLEX fornece a melhor solução encontrada até esse momento. As linhas da Tabela 4.11 que não se encontrarem totalmente preenchidas correspondem a testes para os quais o tempo de computação terminou sem que tenha sido encontrada solução.

Tabela 4.11 - Resultados obtidos pelo CPLEX para o VRPTW<sub>1</sub> com duração de rota  $\leq 1h$

<b>Dia da Semana</b>	<b>Nº de Veículos</b>	<b>Tempo Computação (horas)</b>	<b>Função Objetivo (km)</b>	<b>GAP (%)</b>	<b>Nº Soluções Encontradas</b>
Segunda-feira	10	10	-	-	-
	12	5	-	-	-
	14	3	82,73	10,93	14
	16	2	87,88	1,46	17
Terça-feira	12	10	-	-	-
	14	5	-	-	-
	16	3	91,28	15,21	4
	18	2	105,33	6,45	7
Quarta-feira	15	10	-	-	-
	17	5	97,69	7,61	6
	19	3	106,81	1,59	9
	21	2	120,10	0,28	10
Quinta-feira	12	10	-	-	-
	14	5	-	-	-
	16	3	86,05	14,27	7
	18	2	90,45	4,95	14
Sexta-feira	3	0,0012	40,00	0,00	2
Domingo	8	10	-	-	-
	10	5	62,21	36,40	9
	12	3	65,34	20,38	11
	14	2	70,25	4,70	33

Considerando 1 hora para duração máxima de cada rota e tomando para função objetivo a minimização das distâncias percorridas entre vértices (modelo VRPTW<sub>2</sub>), obtiveram-se tempos de computação elevados (10 horas). Ao fixar o número de veículos a ser usado na obtenção das rotas verificou-se empiricamente que o problema se torna mais fácil (modelo VRPTW<sub>1</sub>), contudo o número de veículos fixado excedeu o número máximo disponível em 6 veículos.

Verifica-se, pelos resultados apresentados na Tabela 4.11, que aumentando o número de veículos disponíveis, o tempo de computação requerido para alcançar uma solução cada vez mais perto da solução ótima diminui (valor de GAP a tender para 0%), no entanto não existe uma relação linear entre cada instância em cada dia de recolhas, ou seja, aumentando o número de veículos em 2 unidades não se verifica que o tempo de computação e o GAP alcançados decresçam linearmente. Entre cada dia da semana já era de esperar que as soluções obtidas e os valores de GAP variassem sem qualquer relação, visto que em cada dia estão envolvidos doadores diferentes e, conseqüentemente, *inputs* (tais como distâncias e tempos) diferentes. De referir também, que em cada dia, à medida que o número de veículos aumenta, aumenta também a distância total percorrida (função objetivo).

Constata-se ainda que, para qualquer dia da semana, quando se pretende obter soluções para os números máximos de veículos disponíveis, expressos na Tabela 4.8, impondo um tempo de computação máximo de 10 horas, o *software* não encontra nenhuma solução admissível. Por esta razão, adotar-se-á para o VRPTW<sub>1</sub> um procedimento semelhante ao considerado para o VRPTW<sub>2</sub>, isto é, serão repetidos os testes computacionais anteriormente mencionados, restringindo a duração das rotas a 2 horas. Considerou-se um tempo máximo de computação de 3 horas em cada teste realizado, no entanto, para quarta-feira a solução foi obtida em 44 minutos. A Tabela 4.12, indica os valores obtidos.

Para o dia de sexta feira não foi realizado este teste computacional uma vez que isso conduziria inevitavelmente a 3 rotas, visto que se obrigaria a utilização de exatamente 3 veículos que visitariam os únicos 3 doadores a visitar. Assim, o CPLEX desenvolveria 3 rotas, cada uma com duração inferior a 2 horas, o que levaria à mesma solução determinada anteriormente só que neste caso envolveria elevados tempos de espera, caso o *software* fizesse uso das 2 horas de duração.

Tabela 4.12 - Resultados obtidos pelo CPLEX para o VRPTW<sub>1</sub> com duração de rota  $\leq 2h$

Dia da Semana	Nº de Veículos	Tempo de Computação Máximo (horas)	Função Objetivo (km)	GAP (%)	Nº Soluções Encontradas
Segunda-feira	10		58,88	10,93	6
Terça-feira	12		68,30	12,14	5
Quarta-feira	15	3	78,70	0,00	12
Quinta-feira	12		61,37	2,95	27
Domingo	8		36,57	7,88	31

Após os testes realizados, verifica-se uma vez mais que a restrição que define a duração máxima de realização de uma rota apresenta grande influência nos resultados apresentados pelo CPLEX. Onde primeiramente não era possível obter solução em 10 horas de computação, passou a haver várias soluções num tempo de computação consideravelmente menor.

Para tentar obter rotas em que a sua duração máxima seja inferior ou igual às obtidas anteriormente, procedeu-se à implementação do VRPTW<sub>4</sub> e VRPTW<sub>3</sub>. Relativamente aos testes anteriormente realizados, a diferença traduz-se na função objetivo em que pretende minimizar o tempo total gasto na realização das rotas. Não são tidos em consideração os tempos de serviço nem os tempos de espera a que cada veículo está sujeito. Com a realização destes testes pretende-se analisar se é possível atingir melhores resultados e consequentemente melhores rotas com esta nova função objetivo.

No sentido de se tentar encontrar as soluções ótimas ou as soluções que estejam o mais perto disso possível procedeu-se à implementação do modelo de PLIM associado ao VRPTW<sub>4</sub>, em que a função objetivo tem como finalidade minimizar o tempo despendido nas deslocações entre vértices, em vez de se tentar minimizar a distância realizada entre os vértices. Como restrição permite-se que um número menor de veículos seja utilizado face ao número total de veículos disponíveis. Assim, implementou-se o VRPTW<sub>4</sub>, limitando o tempo a 3 horas de computação, assumindo num dos conjuntos de testes uma duração máxima de 1 hora e no outro uma duração máxima de 2 horas para cada rota. Para o dia de sexta-feira a solução foi encontrada após 3,93 segundos e 3,83 segundos, respetivamente para o tempo máximo de 1 hora e 2 horas de duração de uma rota. Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 4.13.

Através dos resultados apresentados, obtidos através dos testes computacionais realizados no CPLEX, é notória a diferença entre os valores de GAP obtidos quando a restrição que define a duração máxima de uma rota muda de 1 hora para 2 horas. Um acontecimento que pode justificar este facto é que ao considerar uma restrição menos exigente (tempo máximo de 2 horas em vez de tempo máximo de 1 hora), incluem-se possivelmente mais soluções e, por conseguinte, é possível que o *software* despenda o mesmo tempo ou menos para alcançar uma solução ótima ou próxima disso.

Para o VRPTW<sub>4</sub>, restringindo a duração máxima de cada rota a 1 hora, não se conseguiu obter solução para terça-feira, quarta-feira nem quinta-feira. No entanto, para ir ao encontro do que é mais benéfico para a Re-food Almada (redução do número de veículos a utilizar para a execução das rotas e duração máxima de 1 hora para realizar cada rota), procedeu-se à realização dos mesmos testes, mas alterando um parâmetro do *software* denominado de “*probing level*”. Este parâmetro pode melhorar drasticamente o desempenho do CPLEX, contudo poderá exigir um tempo de computação maior. O *probing level* auxilia em problemas com variáveis binárias em vez de variáveis inteiras gerais e irá definir a quantidade de “sondagem” nas variáveis a ser realizada antes do PLIM (*CPLEX Performance Tuning for Mixed Integer Programs*, 2016). Os resultados obtidos com esta alteração efetuada no *software*, com um nível 3, correspondendo à sondagem mais agressiva, e considerando um tempo máximo de computação de 3 horas, encontram-se na Tabela 4.14.

Tabela 4.13 - Resultados obtidos pelo CPLEX para o VRPTW4 com duração de rota  $\leq 1h$  e duração de rota  $\leq 2h$

Dia da Semana	Duração máxima da rota	Nº de Veículos Disponíveis	Tempo de Computação Máximo (horas)	Nº de Veículos Necessários	Função Objetivo (horas)	GAP (%)	Nº Soluções Encontradas
Segunda-feira	1 hora	10	3	10	2:43	39,98	20
Terça-feira		12		-	-	-	-
Quarta-feira		15		-	-	-	-
Quinta-feira		12		-	-	-	-
Sexta-feira		3		2	0:46	0,00	2
Domingo		8		8	2:01	49,05	50
Segunda-feira		2 horas		10	3	4	1:46
Terça-feira	12		5	2:03		18,80	21
Quarta-feira	15		5	1:57		12,53	9
Quinta-feira	12		5	1:44		13,47	18
Sexta-feira	3		1	0:37		0,00	3
Domingo	8		4	1:14		19,50	15

Tabela 4.14 - Resultados obtidos pelo CPLEX para o VRPTW4 com duração de rota  $\leq 1h$  e alteração do parâmetro "probing"

Dia da Semana	Nº de Veículos Disponíveis	Tempo de Computação Máximo (horas)	Nº de Veículos Necessários	Função Objetivo (horas)	GAP (%)	Nº Soluções Encontradas
Segunda-feira	10	3	10	2:52	43,54	18
Terça-feira	12		11	2:44	56,07	2
Quarta-feira	15		12	3:16	45,39	10
Quinta-feira	12		11	2:48	38,30	14
Sexta-feira	3		2	0:46	0,00	3
Domingo	8		8	2:07	53,22	44

Com a alteração do parâmetro *probing level* de *default* para *level 3*, obteve-se solução nos testes realizados para terça-feira, quarta-feira e quinta-feira, onde anteriormente não era possível obter uma única solução no período de 3 horas. Contudo, verifica-se que as soluções obtidas para segunda-feira e domingo apresentam piores valores de GAP e menor número de soluções encontradas. Tal pode ser justificado com o facto de nos últimos dois dias mencionados se conseguir obter uma solução razoável sem ser alterado qualquer parâmetro no *software* e que caso alguma alteração seja feita, será necessário um maior tempo de computação para obter a solução apresentada com os parâmetros *default*. Para sexta-feira, utilizando o *probing* num nível 3 foi detetada mais uma solução, no entanto a solução ótima gerada é a mesma que se obteve aquando da realização do teste computacional sem qualquer alteração no parâmetro em questão.

Por fim, seguiu-se a implementação do modelo associado ao VRPTW<sub>3</sub>, com o intuito de se compreender como o modelo se comportava com a minimização dos tempos despendidos no decorrer dos percursos entre doadores e depósitos, fazendo restringir o número de veículos como fixo em cada dia da semana. Foram realizados dois testes para cada instância com tempo máximo de computação de 10 horas e 3 horas, respetivamente, em que primeiramente se definiu uma duração máxima por rota de 1 hora e seguidamente uma duração máxima por rota de 2 horas. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Resultados obtidos pelo CPLEX para o VRPTW<sub>3</sub> com duração de rota ≤ 1h e duração de rota ≤ 2h

Dia da Semana	Duração máxima da rota	Nº de Veículos	Tempo de Computação Máximo (horas)	Tempo de Computação Utilizado (horas)	Função Objetivo (horas)	GAP (%)	Nº Soluções Encontradas	
Segunda-feira	1 hora	10	10	10	-	-	-	
Terça-feira		12			-	-	-	
Quarta-feira		15			-	-	-	
Quinta-feira		12			-	-	-	
Sexta-feira		3			0,001	0:58	0,0	2
Domingo		8			10	-	-	-
Segunda-feira	2 horas	10	3	0,020	2:12	2,20	5	
Terça-feira		12		3	2:31	4,18	18	
Quarta-feira		15		0,001	2:54	0,00	4	
Quinta-feira		12		0,017	2:19	0,50	12	
Domingo		8		0,083	1:26	2,40	14	

Relativamente ao dia de sexta-feira, aplicou-se no modelo VRPTW<sub>3</sub> o mesmo procedimento aplicado no modelo VRPTW<sub>1</sub>. Isto é, quando a duração máxima de uma rota é de 2 horas, não se justifica a aplicação do teste computacional.

Similarmente às soluções obtidas para o VRPTW<sub>1</sub>, no VRPTW<sub>3</sub> também não foi possível obter uma solução durante o tempo de computação de 10 horas, quando o número de veículos se manteve fixo no valor correspondente ao número máximo de veículos disponíveis em cada dia e se restringia a duração máxima de cada rota a 1 hora. Observando a Tabela 4.15, verifica-se que aumentando a duração máxima de uma rota para 2 horas foi possível obter melhores valores de GAP num menor tempo de computação, comparativamente com os valores alcançados para o VRPTW<sub>1</sub> nas mesmas circunstâncias (Tabela 4.12).

Verifica-se ainda que para o modelo VRPTW<sub>3</sub> quando a duração máxima da rota é de 2 horas, o CPLEX não necessita do tempo máximo de computação fornecido (exceto para o dia de terça-feira). No entanto, são obtidas soluções com valores de GAP diferentes de zero. Este acontecimento pode justificar-se com o facto de o *software* já ter encontrado a solução ótima após segundos ou minutos dando por encerrado o teste de computação.

Após os testes computacionais realizados e de acordo com o que é mais vantajoso para a Re-food Almada na reestruturação das suas rotas, foram selecionadas as rotas obtidas num tempo de computação de 3 horas, usando o VRPTW<sub>4</sub> e alternado o parâmetro *probing level* quando não era possível obter solução sem essa alteração. Os valores obtidos para as rotas selecionadas em cada dia estão resumidos na Tabela 4.16 e no Anexo G encontram-se as rotas detalhadas com a respetiva hora de visita a cada doador. No Anexo G1, é ainda possível visualizar o percurso das 10 rotas geradas para a segunda-feira.

A Figura 4.5, representa a rota número 4 gerada para segunda-feira, sendo indicado através da cor roxo, o percurso a realizar para efetuar a rota. Esta tem início no depósito de origem denominado de Rotunda (representado com um x de cor azul) às 20:54 horas, tendo de ser recolhidas as doações de dois doadores. A rota termina no depósito designado como ReFoodFim às 21:54 horas.

De acordo com o Anexo G, é perceptível que em certas instâncias, algumas das rotas geradas pelo CPLEX assumem a duração máxima de 1 hora. No entanto, verifica-se que em determinados casos o tempo de duração poderia ter sido definido como inferior a 1 hora. Aparentemente, o *software* obtém rotas que ficam próximas do tempo de duração máxima ou em que este é atingido. De facto, não estando a função objetivo definida para minimizar os tempos efetivamente despendidos em cada doador e os tempos de espera a que cada veículo está sujeito, do ponto de vista do problema de otimização, duas soluções que incluam rotas semelhantes percorridas em tempos distintos são igualmente boas (têm o mesmo valor para a função objetivo).

Este acontecimento poderá não ser considerado como uma desvantagem, visto que no contexto real, o voluntário poderá efetivamente demorar 1 hora ou mais a completar a respetiva rota, devido ao trânsito ou até mesmo por atrasos na entrega das doações por parte dos doadores. No entanto, o inverso também pode ser verificado, ou seja, o voluntário sabe que a rota que deve realizar tem duração máxima de 1 hora e tem conhecimento das janelas horárias em que deve visitar cada doador, por isso, se houver pouco trânsito e as doações estiverem prontas mais cedo ou sem atrasos, o voluntário conseguirá terminar a sua rota em menos tempo, finalizando mais rápido o seu trabalho de voluntariado.



*Figura 4.5 - Rota número 4 gerada para segunda-feira*

Ao gerar as rotas, por vezes não foi possível ao CPLEX introduzir mais do que dois doadores por rota devido ao tempo de serviço estabelecido (15 minutos) para cada doador e ainda ao tempo a percorrer entre vértices. O tempo de serviço foi arbitrado para este estudo, contudo deve ser feito um esforço para haver um compromisso por parte dos doadores para que tenham as doações prontas na janela horária indicada. Se tal se justificar, poderão ainda ser alterados os algoritmos implementados de modo a incluir tempos de serviço distintos em cada doador.

Tabela 4.16 - Valores obtidos para as rotas selecionadas a implementar na Re-food Almada

<b>Dia da Semana</b>	<b>Nº de Veículos Disponíveis</b>	<b>Nº de Veículos Necessários</b>	<b>Função Objetivo (horas)</b>	<b>GAP (%)</b>	<b>Nº Soluções Encontradas</b>
Segunda-feira	10	10	2:43	39,98	20
Terça-feira	12	11	2:44	56,07	2
Quarta-feira	15	12	3:16	45,39	10
Quinta-feira	12	11	2:48	38,30	14
Sexta-feira	3	2	0:46	0,00	3
Domingo	8	8	2:01	49,05	50

No decorrer da realização dos testes para os 4 modelos de VRPTW, o *software* demonstrou dificuldade em otimizar as soluções admissíveis encontradas e consequentemente diminuir o valor do GAP. Veja-se o exemplo de um teste em que foram encontradas 50 soluções (Tabela 4.14, dia de domingo) e apenas se obteve um GAP de 49% num período de 3 horas.

De acordo com o que é mais vantajoso para a organização, isto é, reduzir o número de veículos necessários para efetuar as rotas, quer seja utilizado o modelo associado a VRPTW<sub>2</sub> quer recorrendo ao modelo dado por VRPTW<sub>4</sub>, de forma eficiente (menor tempo de computação e menor valor de GAP, comparativamente com outros modelos), a duração máxima de uma rota terá que ser menor ou igual a 2 horas.

No desenvolvimento de outras variantes do VRP, nos trabalhos apresentados por Mesquita e Rodrigues et al. (2017, 2018) o uso do *software* CPLEX também apresentou algumas limitações referentes ao número de veículos/navios disponíveis em cada instância, sendo por vezes impossível obter soluções num tempo de computação “razoável”. Nesses trabalhos, os problemas não são resolvidos de forma eficiente em alguns casos e noutros nem sequer se encontra solução.

No presente estudo de caso foi possível obter melhorias nas rotas apresentadas e utilizadas inicialmente pela Re-food Almada apesar de não haver garantia de que estas sejam soluções ótimas. A Tabela 4.17 apresenta o número de rotas implementadas na ONG e o número de rotas propostas com este estudo.

Tabela 4.17 - Diminuição no número de rotas na Re-food Almada

	<b>Número de rotas da Re-food Almada</b>	<b>Número de rotas propostas para a Re-food Almada</b>
Segunda-feira	13	10
Terça-feira	17	11
Quarta-feira	15	12
Quinta-feira	13	11
Sexta-feira	3	2
Domingo	13	8

Consta-se que o número de rotas propostas é inferior ao número de rotas implementadas atualmente pela Re-food Almada, traduzindo-se consequentemente numa redução significativa do número de voluntários necessários para a realização de todas as rotas de recolha de alimentos.

## **5. Afetação de Recursos Humanos a Rotas de Veículos**

Abordado o problema de roteamento de veículos, torna-se agora necessário abordar o problema de afetação de recursos. Para que a ONG alcance a otimização das rotas de veículos que lhe permite obter uma maior eficiência, não só deve ter as rotas restruturadas, por forma a otimizar os recursos disponíveis, como também a afetação dos recursos humanos a essas devem ser realizadas de forma ótima.

Começar-se-á por apresentar o problema de afetação de recursos humanos nas rotas da Re-food Almada, considerando mais concretamente um PAG. De seguida, o modelo de programação linear inteira que dará resposta ao problema de afetação é descrito, sendo posteriormente implementado e validada a sua aplicabilidade através de um exemplo, com recurso à ferramenta *OpenSolver* e ao *software* CPLEX. Por fim, serão apresentados os resultados obtidos.

### **5.1. Introdução do Problema de Afetação de Recursos Humanos às Rotas da Re-food Almada**

De modo a tornar possível a aplicação do Problema de Afetação, é fundamental definir quais os critérios a ter em consideração.

Todas as rotas definidas para recolha de alimentos devem ser realizadas, isto é, nenhum doador deve ficar sem ser visitado, visto que isso implicaria que os alimentos não seriam doados e conseqüentemente não seriam entregues a pessoas carenciadas. Para tal, a todas as rotas devem ser afetos voluntários.

Pretende-se que um voluntário realize apenas uma rota por semana, e somente se não existirem voluntários disponíveis para todos os horários em todos os dias de recolha é que será atribuído o mesmo voluntário a duas rotas semanais. Assim, a capacidade máxima que um voluntário apresenta é de duas rotas por semana.

Consoante as disponibilidades diárias fornecidas pelos voluntários e os horários de início de rota, pode acontecer que um voluntário seja afetado a mais do que uma rota no mesmo dia. Porém, um voluntário não consegue realizar duas rotas em simultâneo. Antes de ser efetuada qualquer afetação de voluntários às rotas é de extrema importância que se verifique se existe mais do que um voluntário disponível para efetuar rotas no mesmo dia e horário. Caso não exista, deve ser apelado aos voluntários que tenham disponibilidade variável, que se voluntariem para colaborar nos turnos necessários.

Somente após a definição das rotas de veículos estar concluída é que, considerando as disponibilidades horárias diárias dos voluntários, é possível criar uma matriz designada de “Rotas Possíveis”. Esta matriz auxiliará na resolução do Problema de Afetação uma vez que terá em consideração as janelas horárias em que os voluntários estão disponíveis, enquanto considera simultaneamente as horas definidas para início de cada rota.

Considerando todos os critérios que conduzem a uma afetação ótima dos voluntários às rotas, pode-se afirmar que estamos perante um PAG. De forma a resolver este problema, o objetivo não será a minimização dos custos como habitualmente é implementado, visto que estamos a lidar com ações voluntárias. Neste caso, o objetivo consiste em maximizar as preferências dos voluntários no que diz respeito às rotas, mais propriamente ao depósito de origem a que cada uma está associado.

Um dos problemas detetados na incorreta afetação dos voluntários às rotas é a não consideração do ponto de partida que os voluntários utilizam para iniciarem as rotas que lhes são atribuídas. Tendo isso em consideração, as rotas de veículos reestruturadas têm início em três depósitos, como referido anteriormente, sendo que os voluntários devem referir qual dos depósitos lhes é preferível para iniciar a rota que lhe será atribuída.

Consequentemente, o formulário de inscrição deve sofrer uma alteração, para que lhe possa ser inserida uma questão à qual os voluntários deverão responder a sua preferência relativamente ao ponto de partida para iniciar a rota. A Figura 5.1 é um exemplo da questão que deve ser introduzida.

“Qual dos seguintes pontos de partida lhe é preferível para iniciar a rota de recolha de alimentos? Preencha com o número de 1 a 3, sendo que cada um corresponde: 1-desfavorável; 2-menos favorável; 3-favorável

Re-food – Centro de Operações                       Rotunda Centro Sul                       Pragal

Nota: O voluntário não terá necessariamente de iniciar a rota nos locais indicados. No entanto, terá obrigatoriamente de começar o mais próximo do local em questão.”

*Figura 5.1- Possível questão a introduzir no formulário de inscrição na Re-food Almada*

No formulário de inscrição deve ainda ser questionado ao voluntário se a sua disponibilidade é variável, para que se possa entrar em contacto com o mesmo caso necessário.

Com a informação das preferências por parte dos voluntários para iniciar a rota num depósito específico, é possível fazer uma nova afetação destes às rotas reestruturadas. Serão reunidos esforços para garantir que a satisfação do voluntário em colaborar com a ONG seja maximizada, diminuindo as desistências relacionadas com a afetação a rotas que não lhes são convenientes.

### **5.1.1. Formulação Matemática e Exemplo de Aplicação**

Na secção 2.4. do presente documento procedeu-se a uma revisão da literatura onde foi descrito o PAG. Os problemas da vida real diferem entre si, fazendo com que os Problemas de Afetação tenham de ser reajustados em cada situação específica. Para formular o PAG utilizou-se a seguinte notação:

## Conjuntos

$S$  – Define o conjunto de rotas a ser realizadas pelos voluntários

$W$  – Define o conjunto de voluntários

## Parâmetros

$c_u$  – Capacidade máxima de recursos em cada voluntário  $u$

$p_{uf}$  – Parâmetro que representa a preferência que um voluntário  $u$  tem em realizar a rota  $f$

$r_{uf}$  – Parâmetro que assume o valor 1 se e só se existir compatibilidade horária e diária entre um voluntário  $u$  e uma rota  $f$

$f$  – Representa uma rota

$u$  – Representa um voluntário

## Variáveis de Decisão

$y_{uf}$  – Variável de decisão que toma o valor 1 quando um voluntário  $u$  é afetado à rota  $f$

Após definida a notação, considera-se que ao PAG é fornecido um conjunto de voluntários  $W = \{1, \dots, w\}$  e um conjunto de rotas a serem realizadas pelos voluntários,  $S = \{1, \dots, s\}$ . Assume-se que o voluntário  $u$  tem um número máximo de rotas às quais pode ser afetado, isto é, tem uma capacidade máxima de recursos  $c_u$  que pode esgotar.

A preferência que um voluntário  $u$  tem pela rota  $f$  é descrita por um parâmetro  $p_{uf}$ . Assume-se que  $p_{uf}$  depende apenas da preferência do voluntário pelo início da rota que, como referido anteriormente, pode acontecer num dos três depósitos distintos. Essa preferência deve ser quantificada de 1 a 3 valores, sendo que: 1 corresponde a desfavorável; 2 corresponde a menos favorável; 3 corresponde a favorável. Note-se que, para cada  $u$ , tem-se  $p_{uf_1} = p_{uf_2}$  sempre que a rota  $f_1$  e a rota  $f_2$  tenham início no mesmo depósito.

Para efeitos de formulação do problema a resolver, serão tidas em consideração apenas as rotas às quais um voluntário poderá ser afetado. Para cada voluntário  $u$  e cada rota  $f$  é necessário considerar um parâmetro  $r_{uf}$  que assume o valor 1 se e só se existir compatibilidade horária e diária entre um voluntário  $u$  e uma rota  $f$ , cujo início coincidirá exatamente com o turno horário em que o voluntário está disponível.

O modelo contém ainda uma variável de decisão binária  $y_{uf}$  que, para todo o conjunto  $W$  e todo o conjunto  $S$ , tomará o valor de 1 quando o voluntário  $u$  for afetado à rota  $f$  ou, caso contrário o valor 0.

Pretende-se afetar os voluntários, maximizando as suas preferências, de modo a que todas as rotas de veículos sejam realizadas, não excedendo a capacidade de recursos de cada voluntário.

Para o PAG em que se pretende maximizar as preferências dos voluntários  $u$  na afetação destes às rotas  $f$ , tem-se a função objetivo:

$$\max \sum_{u=1}^w \sum_{f=1}^s y_{uf} * r_{uf} * p_{uf} \quad (\text{eq. 5.1})$$

Como restrição, é necessário definir que a cada rota é afetado exatamente um voluntário

$$\sum_{u=1}^w y_{uf} * r_{uf} = 1, \quad \forall f \in S, \quad (\text{eq. 5.2})$$

assegurando que cada voluntário não excede a capacidade de recursos que tem disponível ao ser afeto às rotas de veículos

$$\sum_{f=1}^s y_{uf} * r_{uf} \leq c_u, \quad \forall u \in W, \quad (\text{eq. 5.3})$$

e, por fim, garantindo as restrições de integralidade

$$y_{uf} \in \{0,1\}, \quad \forall u \in W, \quad \forall j \in S. \quad (\text{eq. 5.4})$$

O modelo de PAG exibido é um modelo de programação linear inteira (PLI) em que todas as variáveis são discretas, isto é, têm de assumir valores inteiros.

Similarmente ao VRPTW, no caso do PAG, o modelo apresentado deve passar também por uma validação antes de se iniciar a implementação no caso real. Assim, é apresentado o seguinte exemplo de aplicação.

Consideram-se dois dias nos quais existem rotas de recolha de alimentos a realizar: segunda-feira com 6 rotas e terça-feira com 7 rotas. As rotas em cada dia, assim como a hora e o depósito para a iniciar, podem ser visualizados na Tabela 5.1.

*Tabela 5.1 - Informações referentes às Rotas do Exemplo de Aplicação*

Segunda-feira			Terça-feira		
Rota	Hora de Início	Depósito de Início	Rota	Hora de Início	Depósito de Início
RotaA1	18:30	Refood	RotaB1	19:00	Pragal
RotaA2	19:45	Pragal	RotaB2	18:30	Rotunda
RotaA3	18:00	Refood	RotaB3	21:00	Pragal
RotaA4	20:15	Refood	RotaB4	20:45	Refood
RotaA5	21:00	Rotunda	RotaB5	21:30	Refood
RotaA6	21:30	Pragal	RotaB6	19:30	Refood
			RotaB7	20:00	Rotunda

Foram inqueridos 16 voluntários ficticiamente, os quais deram as suas disponibilidades para os dias pretendidos e também definiram quais as suas preferências para iniciar a rota num dos três depósitos. Os dados referidos encontram-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Disponibilidade e Preferência de cada voluntário referente ao Exemplo de Aplicação

	Segunda-feira					Terça-feira					Preferências		
	18h-20h	19h-21h	20h-22h	21h-23h	22h-24h	18h-20h	19h-21h	20h-22h	21h-23h	22h-24h	Refood	Rotunda	Pragal
Ana	X										2	3	1
Maria		X							X		3	1	2
João			X								1	2	3
Carla				X							1	3	2
Dinis		X									3	2	1
Nuno			X							X	2	1	3
Rosa		X									2	1	3
Filipa								X			1	2	3
Júlia								X			1	2	3
Pedro									X		3	1	2
Rui										X	3	2	1
Paula							X				2	3	1
Filipe						X					1	2	3
Élio								X			2	3	1
Alana								X			1	3	2
Sara							X				3	2	1

Tendo em consideração que cada rota tem no máximo a duração de uma hora, é possível determinar o turno em que cada rota está compreendida. Como exemplo, veja-se que a Rota A1 está compreendida no turno das 18 horas às 20 horas. Consequentemente, é possível determinar as rotas a que um voluntário poderá ficar afeto, visto que este forneceu a sua disponibilidade por turnos. Por exemplo, a voluntária Ana poderá ser afeta à rota A1 ou à rota A3 de segunda-feira, visto que estas estão compreendidas na sua janela horária. Assim, o parâmetro  $r_{uf}$  tomará o valor 1, para a voluntária  $u=Ana$ , caso a rota seja  $f=A1$  ou  $f=A3$ .

Antes de se verificar as preferências dos voluntários para iniciar a rota num depósito que lhes é mais favorável, é fundamental verificar se existe mais do que um voluntário disponível em cada turno. Se isso não se verificar, deve-se analisar se esse voluntário não se repete noutra rota em que não existam mais voluntários.

Veja-se o caso da Ana: é a única voluntária disponível para realizar a rota A1 e A3 que estão compreendidas no mesmo turno horário. Tal não pode acontecer, pelo facto de a Ana não conseguir

realizar duas rotas ao mesmo tempo. Sempre que se verifique uma incompatibilidade deste tipo, os gestores dos voluntários deverão encontrar uma alternativa, como por exemplo, solicitar a um voluntário que tenha a disponibilidade variável, a realização de uma rota no turno em questão.

Após se verificar as disponibilidades dos voluntários para cada uma das rotas a efetuar, detetou-se que para além da Ana, também o Filipe é o único voluntário para realizar duas rotas no mesmo dia, no turno das 18 horas às 20 horas, o que se torna impraticável. Caso cada uma dessas rotas ocorresse num dia diferente, já não teríamos um problema a resolver. Verificou-se ainda que o Rui nunca será afetado a nenhuma rota pelo facto de na disponibilidade horária e diária fornecida não existirem rotas para serem executadas.

De forma a combater estes contratempos e garantir que todos os voluntários são afetados às rotas e simultaneamente que todas as rotas são realizadas, fizeram-se as seguintes diligências:

- Verificar se o Rui à terça-feira teria disponibilidade para efetuar uma rota de recolha de alimentos no turno das 18h-20h, que seria considerado em vez do turno das 22h-24h;
- Verificar se o Dinis ou a Rosa estariam disponíveis no turno das 18h-20h, que seria considerado em vez do turno das 19h-21h.

Procedendo às alterações nas disponibilidades dos voluntários, a Tabela 5.3 representa o parâmetro  $r_{uf}$  quando esta corresponde a 1, isto é, representa, para cada rota, o conjunto de todos os voluntários que, tendo em conta a sua disponibilidade, a podem efetuar.

Tabela 5.3 - Parâmetros  $r_{uf}$  com valor 1 para o Exemplo de Aplicação

Rotas	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Voluntários	Ana	Maria	Ana	João	João	Carla	Rui	Rui	Filipa	Filipa	Maria	Paula	Paula
	Dinis	Rosa	Dinis	Nuno	Nuno		Filipe	Filipe	Júlia	Júlia	Pedro	Sara	Sara
									Élio	Élio			
									Alana	Alana			

Seguidamente construiu-se a matriz cujas entradas são dadas pelos parâmetros  $p_{uf}$  onde, como foi referido,  $u$  representa os voluntários e  $f$  as rotas. Esta matriz expressa as preferências dos voluntários para cada uma das rotas, preferências essas que apenas levam em consideração a preferência do voluntário pelo depósito de início definido em cada rota.

Para resolver o modelo de PLI apresentado no exemplo de aplicação recorreu-se, uma vez mais, à ferramenta *OpenSolver* do *Excel*.

Depois de introduzidos todos os parâmetros do modelo e todas as restrições pretendidas, foi obtida a solução que maximiza as preferências dos voluntários, para qual a função objetivo (que corresponde à

preferência total) apresenta um valor de 33. Os voluntários afetados a cada rota apresentam-se na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Afetação dos voluntários às rotas referentes ao Exemplo de Aplicação com a ferramenta *OpenSolver*

Rotas	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Voluntários	Ana	Rosa	Dinis	Nuno	João	Carla	Filipe	Rui	Júlia	Élio	Pedro	Sara	Paula

Como o número de voluntários apresentados no exemplo é superior ao número de rotas a realizar, existem três voluntários que não foram atribuídos a rotas: Maria, Filipa e Alana. Estas voluntárias não foram afetadas a nenhuma rota por apresentarem uma preferência inferior em comparação à daqueles que foram atribuídos às rotas que elas também poderiam realizar ou ainda pelo facto de, tendo a mesma preferência que os voluntários afetados, terem sido rejeitadas pela ferramenta utilizada por razões atribuíveis apenas à forma como o algoritmo funciona.

A estas voluntárias poderá ser sugerido que colaborem com a Re-food Almada, como voluntárias no CO nos turnos em que se demonstraram disponíveis. Poderão ainda assim ser um reforço para a realização das rotas em substituição de algum dos voluntários afetados que não possa comparecer.

Verifica-se que o modelo de PLI funciona como pretendido, porém, será feita uma outra validação do mesmo recorrendo ao *software* CPLEX. A implementação do exemplo no *software* pode ser visualizada no Anexo H.

Ao correr o modelo referente ao exemplo, com um tempo de computação de 2,31 segundos, o CPLEX encontra duas possíveis soluções. A solução ótima, para um GAP de 0%, apresenta um valor de 33 para a preferência total, sendo que os voluntários afetados às rotas são os mesmos que foram obtidos através da ferramenta *OpenSolver*.

O modelo de PLI para o PAG apresenta-se duplamente validado pelo que será possível avançar para o caso real.

## 5.2. Aplicação do PAG ao Caso de Estudo

Para que possa ser realizada uma afetação ótima dos voluntários às rotas, deve garantir-se que os voluntários ficam satisfeitos com essa afetação de modo a manterem o seu compromisso com a organização durante um longo período, limitando em particular o número de vezes que é necessário repetir o processo de afetar voluntários a rotas. Assim, criar-se-á estabilidade na ONG ao mesmo tempo que se reduz o trabalho dos responsáveis pela afetação. A preservação dos compromissos assumidos pelos doadores para com a Re-food Almada também se torna fundamental para que seja evitada uma reestruturação das rotas com frequência.

Na sequência do estudo feito no Capítulo 4, segundo o modelo VRPTW<sub>4</sub>, obtiveram-se 54 rotas após a reestruturação: na segunda-feira existem 10 rotas, na terça-feira 11 rotas, na quarta-feira 12 rotas, na quinta-feira 11 rotas, na sexta-feira 2 rotas e por fim no domingo 8 rotas. A cada uma destas rotas é necessário afetar um voluntário.

Dado que, em determinadas épocas do ano, a Re-food Almada conta com um número reduzido de voluntários, será considerada a existência de 54 voluntários inscritos, cada um dos quais precisa de ser afeto a uma rota, ou seja, considera-se o número mínimo de voluntários necessários para que todas as rotas sejam realizadas, salvo nas raras exceções em que um voluntário se oferece para realizar até duas rotas por semana (não sendo assim necessários os 54 voluntários). Este número de voluntários a considerar e os dados a eles associados foram gerados aleatoriamente pela impossibilidade de inquirir os voluntários sobre este assunto, devido à pandemia mundialmente instalada.

O início de cada rota gerada está associado a um dos cinco turnos referidos anteriormente. Esta relação entre a hora de início de uma rota e o turno a ela associado, facilitará a criação da matriz das “Rotas Possíveis”. A Tabela 5.5 estabelece uma associação entre a hora de início das rotas de segunda-feira com um turno horário e o depósito de origem. Ao turno 1 corresponde o intervalo das 18h-20h, ao turno 2 o intervalo das 19h-21h, ao turno 3 o intervalo das 20h-22h, ao turno 4 o intervalo das 21h-23h, e por fim ao turno 5 o intervalo das 22h-24h. Verifica-se que na segunda-feira não existe nenhuma rota para ser efetuada durante o turno designado por 5. Sugere-se que no formulário de inscrição sejam retirados os turnos horários nos dias em que não existam rotas de recolha de alimentos a ser realizadas, de modo a evitar que os voluntários confirmem a sua disponibilidade para recolher alimentos num turno em que não existe rotas.

*Tabela 5.5 - Turno horário a que pertence cada rota da segunda-feira*

<b>Rota</b>	<b>Hora de início</b>	<b>Depósito de partida</b>	<b>Hora de fim</b>	<b>Turno a que pertence a rota</b>
Rota1	21:48	Rotunda	22:48	4
Rota2	21:45	Rotunda	22:45	4
Rota3	21:40	Rotunda	22:40	4
Rota4	20:54	Rotunda	21:54	3
Rota5	20:42	Refood	21:42	3
Rota6	20:42	Rotunda	21:42	3
Rota7	20:54	Rotunda	21:54	3
Rota8	19:30	Refood	20:30	2
Rota9	18:06	Refood	19:06	1
Rota10	18:30	Pragal	19:30	1

Os dados referentes aos voluntários, isto é, a disponibilidade horária e diária e a preferência para iniciar a rota em determinado depósito, como referido anteriormente, foram gerados aleatoriamente. A Tabela 5.6 apresenta os dados gerados de voluntários inscritos no dia de segunda-feira. Tendo em conta que não são necessários voluntários para o turno 5 na segunda-feira, os voluntários inscritos são suficientes para se poder prosseguir com a melhor afetação destes às rotas.

*Tabela 5.6 - Dados gerados aleatoriamente de voluntários inscritos no dia de segunda-feira*

	Segunda-feira				Turno	Quarta-feira	Quinta-feira	Turno	Preferências		
	18h-20h	19h-21h	20h-22h	21h-23h					Refood	Rotunda	Pragal
<b>Vol1</b>	X				1				1	2	3
<b>Vol2</b>	X				1	X		2	3	1	2
<b>Vol3</b>			X		3				3	2	1
<b>Vol4</b>			X		3				1	2	3
<b>Vol5</b>				X	4				2	3	1
<b>Vol6</b>				X	4				3	2	1
<b>Vol7</b>		X			2		X	2	2	1	3
<b>Vol8</b>			X		3				2	3	1
<b>Vol9</b>			X		3				3	2	1
<b>Vol10</b>			X		3				2	1	3

Constata-se que tanto o voluntário 2 (Vol2) como o voluntário 7 (Vol7) mencionaram mais do que um dia disponível para exercer voluntariado na Re-food Almada, o que é sempre vantajoso caso não existam mais voluntários disponíveis nesses horários. No entanto, um voluntário nunca deverá realizar mais do que duas rotas, por forma a evitar a sua sobrecarga e a dar oportunidade a todos os outros voluntários inscritos.

Considerando a disponibilidade apresentada dos voluntários e a hora de início de cada rota, é possível fazer a correspondência entre os turnos associados anteriormente a cada uma das rotas e desenvolver a matriz das rotas possíveis, onde a cada valor 1 corresponde uma rota possível de realizar por determinado voluntário. A matriz referida é representada pela Tabela 5.7 para as rotas e voluntários de segunda-feira.

Tabela 5.7 - Matriz das rotas possíveis de realizar por cada voluntário

	Rota1	Rota2	Rota3	Rota4	Rota5	Rota6	Rota7	Rota8	Rota9	Rota10
<b>Vol1</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>Vol2</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>Vol3</b>	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
<b>Vol4</b>	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
<b>Vol5</b>	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
<b>Vol6</b>	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
<b>Vol7</b>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<b>Vol8</b>	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
<b>Vol9</b>	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
<b>Vol10</b>	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0

A matriz anteriormente apresentada deve ser cuidadosamente analisada de modo a perceber se existe mais do que um voluntário possível de ser afeto a uma rota, pois caso só exista um voluntário para determinada rota, deve-se verificar se esse não teria de ser afeto a mais nenhuma (como demonstrado no exemplo de aplicação). No dia apresentado verifica-se um exemplo desta situação, para as rotas 1, 2 e 3 apenas estão disponíveis os voluntários Vol5 e Vol6, pelo que um deles teria de estar em dois lugares ao mesmo tempo, o que não é possível. Comparativamente, para realizar as rotas 4, 5, 6 e 7 existem 5 possíveis voluntários a afetar. Para que todas as rotas possam ser realizadas, o responsável pela afetação de voluntários às rotas teria de contactar os voluntários cujas disponibilidades são variáveis, de maneira a averiguar a possibilidade de alteração de turno. Supõe-se que o voluntário Vol4 tem essa flexibilidade, podendo efetuar uma rota no turno 4 em vez do turno 3. Assim, a Tabela 5.7 será substituída pela Tabela 5.8 que apresenta várias possibilidades de todos voluntários disponíveis realizarem uma rota, independentemente da sua preferência.

Similarmente à matriz de rotas possíveis, é desenvolvida a matriz das preferências definidas por cada voluntário para cada rota. A Tabela 5.9 representa a matriz de preferências dos voluntários inscritos na segunda-feira.

Os dados apresentados até ao momento nesta subsecção dizem respeito ao dia de segunda-feira, contudo o mesmo procedimento foi aplicado aos restantes dias, tendo sido desenvolvida uma folha de *Excel* com o procedimento automatizado. Esta irá facilitar os responsáveis pelos voluntários aquando da necessidade de afetar voluntários às rotas, sendo apenas necessário que introduzam as disponibilidades dos voluntários e as suas preferências. Caso nenhuma rota necessite de ser alterada, todo o processo será automatizado.

Tabela 5.8 - Matriz das rotas possíveis de realizar por cada voluntário com alteração no Vol4

	Rota1	Rota2	Rota3	Rota4	Rota5	Rota6	Rota7	Rota8	Rota9	Rota10
<b>Vol1</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>Vol2</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>Vol3</b>	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
<b>Vol4</b>	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
<b>Vol5</b>	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
<b>Vol6</b>	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
<b>Vol7</b>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<b>Vol8</b>	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
<b>Vol9</b>	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
<b>Vol10</b>	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0

A matriz de rotas possíveis e a matriz de preferências obtidas representam os *inputs* necessários a fornecer ao PAG para resolver o problema de afetação dos voluntários através da implementação do modelo de PLI no CPLEX.

O *software* forneceu uma solução otimizada após um teste de computação de 12 segundos, com um GAP de 0% e um valor de 78 para a função objetivo (correspondendo à preferência total). A afetação de cada voluntário às rotas encontra-se na Tabela 5.10.

Tabela 5.9 - Matriz de preferências de acordo com as preferências dos voluntário inscritos na segunda-feira

	Rota1	Rota2	Rota3	Rota4	Rota5	Rota6	Rota7	Rota8	Rota9	Rota10
Depósito de início	Rotunda	Rotunda	Rotunda	Rotunda	Refood	Rotunda	Rotunda	Refood	Refood	Pragal
<b>Vol1</b>	3	3	3	3	1	3	3	1	1	2
<b>Vol2</b>	2	2	2	2	3	2	2	3	3	1
<b>Vol3</b>	1	1	1	1	3	1	1	3	3	2
<b>Vol4</b>	3	3	3	3	1	3	3	1	1	2
<b>Vol5</b>	1	1	1	1	2	1	1	2	2	3
<b>Vol6</b>	1	1	1	1	3	1	1	3	3	2
<b>Vol7</b>	3	3	3	3	2	3	3	2	2	1
<b>Vol8</b>	1	1	1	1	2	1	1	2	2	3
<b>Vol9</b>	1	1	1	1	3	1	1	3	3	2
<b>Vol10</b>	3	3	3	3	2	3	3	2	2	1

Verifica-se que os voluntários designados como Vol2, Vol7 e Vol42 são os únicos que irão realizar duas rotas por semana, enquanto todos os outros realizarão apenas uma. Os voluntários Vol26, Vol34 e Vol54 não ficaram afetados a nenhuma rota. Este acontecimento pode ser justificado pelos baixos valores definidos por estes voluntários para as suas preferências associadas às rotas disponíveis, levando a que o CPLEX escolhesse outro voluntário com uma preferência mais elevada.

Sendo que três voluntários terão de realizar duas rotas e três voluntários não foram afetados a nenhuma rota, existe a possibilidade de averiguar se algum dos três voluntários que não foi alocado poderá realizar uma rota em substituição de quem tem duas rotas a seu encargo. Em contexto real, ou seja, numa ONG, todas estas decisões dependem da disponibilidade dos voluntários.

O teste computacional realizado no CPLEX para implementação e resolução do PAG no caso de estudo, apresentou tempos de computação e GAP com valores comparativamente mais baixos do que aqueles obtidos aquando da implementação dos modelos de VRPTW. Como seria expectável, o número de restrições introduzido tem um elevado peso na resolução do problema implementado, assim como o facto do problema ser caracterizado por variáveis binárias ao invés de um conjunto de variáveis binárias e variáveis reais não negativas.

Tabela 5.10 – Afetação dos voluntários às rotas reestruturadas

	<b>Voluntário</b>	<b>Rota Atribuída</b>		<b>Voluntário</b>	<b>Rota Atribuída</b>	
<b>segunda-feira</b>	Vol1	9	<b>quarta-feira</b>	Vol28	1	
	<b>Vol2*<sup>2</sup></b>	10		Vol29	8	
	Vol3	7		Vol30	4	
	Vol4	3		Vol31	7	
	Vol5	1		Vol32	6	
	Vol6	2		Vol33	2	
	<b>Vol7*</b>	8		Vol34	-	
	Vol8	6		<b>Vol7*</b>	8	
	Vol9	4		Vol35	10	
	Vol10	5		Vol36	3	
<b>terça-feira</b>	Vol11	11	<b>quinta-feira</b>	Vol37	11	
	Vol12	5		Vol38	2	
	Vol13	8		Vol39	9	
	Vol14	7		Vol40	5	
	Vol15	6		Vol41	6	
	Vol16	1		<b>Vol42*</b>	1	
	Vol17	4		Vol43	4	
	Vol18	10		Vol44	7	
	Vol19	9		<b>sexta-feira</b>	Vol45	1
	Vol20	3			Vol46	2
Vol21	2	<b>domingo</b>	<b>Vol42*</b>	2		
<b>Vol2*</b>	11		Vol47	8		
Vol22	5		Vol48	4		
Vol23	10		Vol49	1		
Vol24	9		Vol50	5		
Vol25	3		Vol51	3		
Vol26	-		Vol52	6		
Vol27	12		Vol53	7		
		Vol54	-			

<sup>2</sup> Os voluntários indicados com \* irão realizar duas rotas de recolha de alimentos semanalmente.

## 6. Conclusões

Neste trabalho abordaram-se dois problemas subjacentes à otimização de rotas de recolha de doações alimentares numa ONG: o VRPTW e PAG.

O principal foco deste trabalho foi o desenvolvimento de rotas que apresentassem as características necessárias para uma posterior e otimizada afetação dos voluntários às mesmas. Primeiramente e como parte da resposta à primeira questão de investigação, foram introduzidos três depósitos de origem, que funcionam como os únicos pontos de partida possíveis para as rotas que se podem gerar, sendo estes posteriormente considerados para afetar os voluntários às rotas determinadas, de acordo com a sua preferência por cada um deles.

Foram desenvolvidos quatro modelos de PLIM de forma a que esses conseguissem dar resposta ao VRPTW aplicado ao estudo de caso. A implementação dos modelos foi realizada no *software* CPLEX, o qual permite determinar soluções ótimas com recurso a um método exato, mais propriamente ao método B&B. De maneira a efetuar uma correta reestruturação de rotas e, respondendo à segunda questão de investigação, foram tidos em consideração os seguintes fatores: os depósitos de origem para cada rota, as janelas horárias para visitar os doadores, os tempos e distâncias a percorrer entre doadores e entre doadores e depósitos.

Procedeu-se à realização de vários testes computacionais com o objetivo de efetuar uma análise de sensibilidade ao *software* e à forma como este apresenta soluções. Esta abordagem permite, também, uma melhor perceção acerca do funcionamento de cada um dos modelos PLIM desenvolvido. O CPLEX demonstrou-se pouco eficiente a resolver os problemas considerados, sendo poucos os casos em que se obteve uma solução ótima. Apesar disso, constatou-se que relaxar as condições que impõem o tempo máximo de duração de cada rota de 1 hora para 2 horas, conduziu a melhores desempenhos por parte do CPLEX. Relativamente aos modelos PLIM desenvolvidos, verificou-se que uma função objetivo que, tente minimizar o tempo percorrido entre vértices em vez da distância, bem com restringir o número de veículos disponíveis, são alterações que conduzem a melhores resultados.

Apesar da pouca eficiência apresentada pelo *software*, foi possível alcançar uma melhoria na reestruturação das rotas da Re-food Almada, diminuindo o número de rotas a efetuar e consequentemente diminuindo o número de voluntários necessários para a realização das mesmas, dando assim resposta à terceira questão de investigação.

Depois de definidas as novas rotas, procedeu-se à resolução do PAG através de um modelo de PLI. Dois *inputs* de grande relevância fornecidos ao modelo foram as disponibilidades horárias e diárias dos voluntários e também as preferências definidas por cada voluntário de acordo com o ponto de partida que lhes era mais favorável para iniciar a rota de recolha, sendo estes os restantes fatores que concluem a resposta à segunda questão de investigação. Os voluntários poderiam ordenar os três depósitos de

origem de acordo a sua preferência, utilizando uma escala de 1 a 3 (para um voluntário o depósito assinalado com 3 seria o ideal para iniciar uma rota). De forma a obter uma solução para o problema de afetar os voluntários às rotas otimizando as suas preferências, utilizou-se novamente o CPLEX que forneceu uma solução ótima de forma eficiente.

Concluindo a resposta à primeira questão de investigação, o mecanismo de afetação desenvolvido permite dar oportunidade aos voluntários de definir as suas preferências de acordo com o local que lhes é mais vantajoso para iniciar a rota, conduzindo certamente a um maior envolvimento e compromisso por parte destes.

De modo a responder à última questão de investigação, a utilização de modelos de programação linear permitiu até certo ponto otimizar as rotas da Re-food Almada. O modelo de PLIM permitiu alcançar soluções melhores que as atualmente existentes, no entanto essas não são consideradas ótimas. Já o modelo de PLI permitiu obter uma solução ótima, afetando os voluntários da melhor forma às rotas propostas.

Como trabalho futuro sugere-se a criação de um modelo matemático alternativo que seja mais forte e consiga alcançar melhores resultados na resolução do VRPTW, quer seja implementado com recurso ao *software* CPLEX ou não. Poderá considerar-se também um modelo de PLIM que, apesar de mais complexo, considere as localizações exatas dos pontos de partida de cada voluntário para a realização de uma rota. Assim, não seriam considerados três depósitos de origem, mas sim um número de localizações para início das rotas igual ao número de voluntários. A solução ótima para um tal modelo, resolveria também o problema de afetação, visto que se minimizaria a distância/tempo a percorrer entre vértices, começando pela menor distância/tempo a percorrer desde o ponto de partida de cada um dos voluntários até ao primeiro doador, associando desde logo os voluntários às rotas.

Uma nova abordagem, seguindo a aplicação de heurísticas construtivas e de melhoria aos modelos de PLIM desenvolvidos para o VRPTW poderia conduzir a menores esforços computacionais, permitindo o aumento de número de veículos e doadores envolvidos no estudo de caso.

Sugere-se também o desenvolvimento de um sistema inteligente para otimização de rotas como o desenvolvido por Barreira (2016), que considere em tempo real a localização do voluntário indicando-lhe qual a rota que deve realizar. Este sistema implicaria uma afetação não fixa dos voluntários às rotas, desenvolvendo rotas de recolha diferentes e apropriadas a cada dia, hora e local.

## 7. Referências Bibliográficas

- Alhindi, A., Alsaidi, A., Alasmay, W., & Alsabaan, M. (2020). Vehicle Routing Optimization for Surplus Food in Nonprofit Organizations. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(3). <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110384>
- Amirudin, N., & Gim, T.-H. T. (2019). Impact of perceived food accessibility on household food waste behaviors: A case of the Klang Valley, Malaysia. *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 104335. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.011>
- Attouni, M. A. K., & Mustaffa, C. S. (2014). How do Non-profit Organizations in Libya Adopt and Use Social Media to Communicate with The Society. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 155, 92–97. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.10.262>
- Awasthi, S. K., Sarsaiya, S., Awasthi, M. K., Liu, T., Zhao, J., Kumar, S., & Zhang, Z. (2020). Changes in global trends in food waste composting: Research challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 299, 122555. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122555>
- Baldacci, R., Mingozzi, A., & Roberti, R. (2012). Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints. *European Journal of Operational Research*, 218(1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.07.037>
- Barreira, N. M. C. (2016). *Sistema Inteligente para Otimização de Rotas*. <https://run.unl.pt/handle/10362/20245>
- Barros, C. P., & Nunes, F. (2008). Social capital in non-profit organizations: A multi-disciplinary perspective. *The Journal of Socio-Economics*, 37(4), 1554–1569. <https://doi.org/10.1016/j.socec.2007.06.004>
- Batista, P., Campos, I., Pires, I., & Vaz, S. (2012). *Do Campo ao Garfo*. Desperdício Alimentar em Portugal. [http://www.cienciaviva.pt/img/upload/do\\_campo\\_ao\\_garfo.pdf](http://www.cienciaviva.pt/img/upload/do_campo_ao_garfo.pdf)
- Blazewicz, J., Ecker, K. H., Pesch, E., Schmidt, G., & Weglarz, J. (2007). *Handbook on Scheduling: From Theory to Applications*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-32220-7>

- Boonsam, P., Suthikarnnarunai, N., & Chitphaiboon, W. (2011). *Assignment Problem and Vehicle Routing Problem for an Improvement of Cash Distribution*. 5.
- Bottani, E., Vignali, G., Mosna, D., & Montanari, R. (2019). Economic and environmental assessment of different reverse logistics scenarios for food waste recovery. *Sustainable Production and Consumption*, 20, 289–303. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.07.007>
- Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuysse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300–313. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
- Branski, R., Arellano, R., Franco, C., & Lima Jr, O. (2010). *Metodologia de Estudo de Casos Aplicada à Logística*.
- Bravi, L., Francioni, B., Murmura, F., & Savelli, E. (2020). Factors affecting household food waste among young consumers and actions to prevent it. A comparison among UK, Spain and Italy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104586. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104586>
- Bräysy, O., & Gendreau, M. (2005). Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms. *Transportation Science*, 39(1), 104–118. <https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0056>
- Campomar, M. C. (1991). Do uso de “estudo de caso” em pesquisas para dissertações e teses em administração. *Revista de administração*, 26(3), 95–97.
- Chen, D., & Yang, Z. (2017, Dezembro 28). *Multiple Depots Vehicle Routing Problem in the Context of Total Urban Traffic Equilibrium* [Research Article]. *Journal of Advanced Transportation*; Hindawi. <https://doi.org/10.1155/2017/8524960>
- Cicatiello, C., & Franco, S. (2020). Disclosure and assessment of unrecorded food waste at retail stores. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 52, 101932. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2019.101932>

- Coderoni, S., & Perito, M. A. (2020). Sustainable consumption in the circular economy. An analysis of consumers' purchase intentions for waste-to-value food. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119870. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119870>
- Conaty, F., & Robbins, G. (2018). A stakeholder salience perspective on performance and management control systems in non-profit organisations. *Critical Perspectives on Accounting*, 102052. <https://doi.org/10.1016/j.cpa.2018.07.001>
- Cordeau, J.-F., Laporte, G., Savelsbergh, M. W. P., & Vigo, D. (2007). Chapter 6 Vehicle Routing. Em C. Barnhart & G. Laporte (Eds.), *Handbooks in Operations Research and Management Science* (Vol. 14, pp. 367–428). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14006-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14006-2)
- CPLEX Performance Tuning for Mixed Integer Programs*. (2016, Agosto 22). [CT742]. <https://www.ibm.com/support/pages/cplex-performance-tuning-mixed-integer-programs>
- Daniele Vigo & Paolo Toth (Eds.). (2014). *Vehicle Routing*. Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://doi.org/10.1137/1.9781611973594>
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1), 80–91. JSTOR.
- Dat, L. Q., Truc Linh, D. T., Chou, S.-Y., & Yu, V. F. (2012). Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products. *Expert Systems with Applications*, 39(7), 6380–6387. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.12.031>
- Degroote, H., González-Velarde, J. L., & De Causmaecker, P. (2018). Applying Algorithm Selection – a Case Study for the Generalised Assignment Problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 69, 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.endm.2018.07.027>
- Desaulniers, G., Desrosiers, J., & Solomon, M. M. (Eds.). (2005). *Column Generation*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/b135457>
- Desrochers, Desrosiers, J., & Solomon, M. (1992). A New Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Operations Research*, 40(2), 342–354. <https://doi.org/10.1287/opre.40.2.342>

- Desrochers, Lenstra, M.W.P. Savelsbergh, J. K., & Soumis, F. (1988). *Vehicle Routing with Time Windows: Optimization and Approximation*. 20.
- Desrosiers, J., Dumas, Y., Solomon, M. M., & Soumis, F. (1995). Chapter 2 Time constrained routing and scheduling. Em *Handbooks in Operations Research and Management Science* (Vol. 8, pp. 35–139). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(05\)80106-9](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(05)80106-9)
- Dev, N. K., Shankar, R., & Qaiser, F. H. (2020). Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104583. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104583>
- Dondo, R. G., & Méndez, C. A. (2016). Operational planning of forward and reverse logistic activities on multi-echelon supply-chain networks. *Computers & Chemical Engineering*, 88, 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.02.017>
- Dotoli, M., & Epicoco, N. (2017). A Vehicle Routing Technique for Hazardous Waste Collection. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 9694–9699. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2051>
- Drexl, M. (2012). Rich vehicle routing in theory and practice. *Logistics Research*, 5(1), 47–63. <https://doi.org/10.1007/s12159-012-0080-2>
- EitFood*. (2019). How Technology is Shaping Food Waste Prevention. <https://www.eitfood.eu/blog/post/how-technology-is-shaping-food-waste-prevention>
- Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1472–1483. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.05.009>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2010.03.002>
- Erdoğan, G. (2017). An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems. *Computers & Operations Research*, 84, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.02.022>

- Faudzi, S., Abdul-Rahman, S., & Abd Rahman, R. (2018). An Assignment Problem and Its Application in Education Domain: A Review and Potential Path. *Advances in Operations Research*, 2018, 1–19. <https://doi.org/10.1155/2018/8958393>
- Filimonau, V., & Gherbin, A. (2017). An exploratory study of food waste management practices in the UK grocery retail sector. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1184–1194. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.229>
- Fisher, M. L., Jörnsten, K. O., & Madsen, O. B. G. (1997). Vehicle Routing with Time Windows: Two Optimization Algorithms. *Operations Research*, 45(3), 488–492. <https://doi.org/10.1287/opre.45.3.488>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2011). Food Loss and Food Waste. <http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/en/>
- Fruta Feia. (2013). Projeto. <https://frutafeia.pt/pt/projecto>
- Gan, X., Wang, Y., Li, S., & Niu, B. (2012). Vehicle routing problem with time windows and simultaneous delivery and pick-up service based on MCPSO. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, undefined-undefined. <https://doi.org/10.1155/2012/104279>
- Gendreau, M., Laporte, G., & Potvin, J.-Y. (2000). Metaheuristics for the Capacitated VRP. Em *The Vehicle Routing Problem* (pp. 129-149). SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications.
- Gendreau, M., & Tarantilis, C. D. (2010). *Solving Large-Scale Vehicle Routing Problems with Time Windows: The State-of-the-Art*. /paper/Solving-Large-Scale-Vehicle-Routing-Problems-with-Gendreau-Tarantilis/6f54eaed1768c353c42267055f5c174a394f28c8
- Giordano, C., Falasconi, L., Cicatiello, C., & Pancino, B. (2020). The role of food waste hierarchy in addressing policy and research: A comparative analysis. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119617. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119617>

- Gmys, J., Mezmaç, M., Melab, N., & Tuyttens, D. (2020). A computationally efficient Branch-and-Bound algorithm for the permutation flow-shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 284(3), 814–833. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.01.039>
- Goodman-Smith, F., Miroso, M., & Skeaff, S. (2020). A mixed-methods study of retail food waste in New Zealand. *Food Policy*, 92, 101845. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101845>
- IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. (2020). <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio>
- Ilakovac, B., Voca, N., Pezo, L., & Cerjak, M. (2020). Quantification and determination of household food waste and its relation to sociodemographic characteristics in Croatia. *Waste Management*, 102, 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.042>
- Ingrao, C., Faccilongo, N., Di Gioia, L., & Messineo, A. (2018). Food waste recovery into energy in a circular economy perspective: A comprehensive review of aspects related to plant operation and environmental assessment. *Journal of Cleaner Production*, 184, 869–892. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.267>
- Iqbal, M. W., Kang, Y., & Jeon, H. W. (2020). Zero waste strategy for green supply chain management with minimization of energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118827. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118827>
- Jemaa, W., Carew, P. J., & Stapleton, L. (2018). Implementing Effective Information Control Systems for Primary Education Support in Developing Countries: An Investigative Field Study of a Voluntary Non-Profit Organisation in Tunisia. *IFAC-PapersOnLine*, 51(30), 171–176. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.281>
- Jepsen, M., Petersen, B., Spoorendonk, S., & Pisinger, D. (2007). Subset-Row Inequalities Applied to the Vehicle-Routing Problem with Time Windows. *Operations Research*, 56(2), 497–511. <https://doi.org/10.1287/opre.1070.0449>

- Kallehauge, B. (2008). Formulations and exact algorithms for the vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 35(7), 2307–2330. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.11.006>
- 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), 285. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2000.tb00200.x>
- Larsen, J. (1999). *Parallelization of the Vehicle Routing Problem with Time Windows*. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/parallelization-of-the-vehicle-routing-problem-with-time-windows>
- Liao, K.-H., & Huang, I.-S. (2016). Impact of Vision, Strategy, and Human Resource on Nonprofit Organization Service Performance. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 224, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.395>
- Liong, C. Y., Ismail, W. R., Omar, K., & Zirour, M. (2008). *Vehicle routing problem: Models and solutions*.
- Lorena, L. A. N., Pereira, M. A., & Salomão, S. N. A. (2003). A relaxação Lagrangeana/surrogate e o método de geração de colunas: Novos limitantes e novas colunas. *Pesquisa Operacional*, 23(1), 29–47. <https://doi.org/10.1590/S0101-74382003000100004>
- Masłowski, D., Kulińska, E., & Kulińska, K. (2019). Application of routing methods in city logistics for sustainable road traffic. *Transportation Research Procedia*, 39, 309–319. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.033>
- Mejía, G., & Velasco, N. (Eds.). (2012). *Production Systems and Supply Chain Management in Emerging Countries: Best Practices: Selected papers from the International Conference on Production Research (ICPR)*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-26004-9>
- Mesquita, M. M. (2018, Fevereiro 20). Um problema de otimização de rotas com janelas temporais. *Um problema de otimização de rotas com janelas temporais*. Um problema de otimização de rotas com janelas temporais. <https://estudogeral.sib.uc.pt/handle/10316/86453>

- Mokhtar, A. R. M., Genovese, A., Brint, A., & Kumar, N. (2019). Improving reverse supply chain performance: The role of supply chain leadership and governance mechanisms. *Journal of Cleaner Production*, 216, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.045>
- Morales, D. R., & Romeijn, H. E. (2005). The Generalized Assignment Problem and Extensions. Em D.-Z. Du & P. M. Pardalos (Eds.), *Handbook of Combinatorial Optimization: Supplement Volume B* (pp. 259–311). Springer US. [https://doi.org/10.1007/0-387-23830-1\\_6](https://doi.org/10.1007/0-387-23830-1_6)
- Moškón, M. (2011). Solving the vaguely defined assignment problems. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 5, 773–780.
- Mousa, T. Y., & Freeland-Graves, J. H. (2017). Organizations of food redistribution and rescue. *Public Health*, 152, 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2017.07.031>
- Murthy, I., & Ransbotham, S. (2019). A new extended formulation of the Generalized Assignment Problem and some associated valid inequalities. *Discrete Applied Mathematics*, 271, 119–143. <https://doi.org/10.1016/j.dam.2019.08.015>
- Nair, Grzybowska, H., Fu, Y., & Dixit, V. V. (2018). Scheduling and routing models for food rescue and delivery operations. *Socio-Economic Planning Sciences*, 63, 18–32. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.06.003>
- Nair, Grzybowska, H., Rey, D., & Dixit, V. (2016). Food Rescue and Delivery: Heuristic Algorithm for Periodic Unpaired Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2548(1), 81–89. <https://doi.org/10.3141/2548-10>
- Nair, Rashidi, T. H., & Dixit, V. V. (2017). Estimating surplus food supply for food rescue and delivery operations. *Socio-Economic Planning Sciences*, 57, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2016.09.004>
- Nishii, L. H., & Wright, P. (2007). Variability Within Organizations: Implications for Strategic Human Resource Management. *CAHRS Working Paper Series*. <https://digitalcommons.ilr.cornell.edu/cahrswp/467>

- OpenSolver for Excel*. (2020). OpenSolver for Excel. <https://opensolver.org/>
- OPL Language User's Manual—IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*. (2020). Versão 12, 168.
- Pardalos, P. M., & Migdalas, A. (Eds.). (2018). *Open Problems in Optimization and Data Analysis*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99142-9>
- Pentico, D. W. (2007). Assignment problems: A golden anniversary survey. *European Journal of Operational Research*, 176(2), 774–793. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.09.014>
- Principato, L. (2018). *Food Waste at Consumer Level*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78887-6>
- Principato, L., Ruini, L., Guidi, M., & Secondi, L. (2019). Adopting the circular economy approach on food loss and waste: The case of Italian pasta production. *Resources, Conservation and Recycling*, 144, 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.025>
- Re-food*. (2013a). O Início. <http://www.re-food.org/blog/o-inicio/>
- Re-food*. (2013b). Núcleos Re-food Sul do Tejo - Almada. <https://www.re-food.org/pt/nucleos/portugal/sul-do-tejo/almada>
- Ribeiro, Rok, J., Harmsen, R., Rosales Carreón, J., & Worrell, E. (2019). Food waste in an alternative food network – A case-study. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.029>
- Rodrigues, V. P., Morabito, R., Yamashita, D., Silva, B. J. V. da, & Ribas, P. C. (2017). Abordagens de otimização para um problema de roteirização e programação de navios petroleiros. *Gestão & Produção*, 24(4), 790–805. <https://doi.org/10.1590/0104-530x1767-16>
- Savelsbergh, M. W. P. (1992). The Vehicle Routing Problem with Time Windows: Minimizing Route Duration. *ORSA Journal on Computing*, 4(2), 146–154. <https://doi.org/10.1287/ijoc.4.2.146>
- Schanes, K., & Stagl, S. (2019). Food waste fighters: What motivates people to engage in food sharing? *Journal of Cleaner Production*, 211, 1491–1501. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.162>

- Schneider, M. (2016). The vehicle-routing problem with time windows and driver-specific times. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 101–119. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.015>
- Seixas, M. P., & Mendes, A. B. (2013, Março 24). *Column Generation for a Multitrip Vehicle Routing Problem with Time Windows, Driver Work Hours, and Heterogeneous Fleet* [Research Article]. *Mathematical Problems in Engineering*; Hindawi. <https://doi.org/10.1155/2013/824961>
- Silva Melo, A. C. da, & Ferreira Filho, V. J. M. (2001). Sistemas de Roteirização e Programação de Veículos. *Pesquisa Operacional*, 21(2), 223–232. <https://doi.org/10.1590/S0101-74382001000200007>
- Solomon, M. M., & Desrosiers, J. (1988). Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems. *Transportation Science*, 22(1), 1–13.
- Stenmarck, Å., Jensen, C., Quested, T., Moates, G., Buksti, M., Cseh, B., Juul, S., Parry, A., Politano, A., Redlingshofer, B., Scherhauser, S., Silvennoinen, K., Soethoudt, H., Zübert, C., & Östergren, K. (2016). *Estimates of European food waste levels*. <http://edepot.wur.nl/378674>
- Taleizadeh, A. A., & Sadeghi, R. (2019). Pricing strategies in the competitive reverse supply chains with traditional and e-channels: A game theoretic approach. *International Journal of Production Economics*, 215, 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.06.011>
- Teigiserova, D. A., Hamelin, L., & Thomsen, M. (2020). Towards transparent valorization of food surplus, waste and loss: Clarifying definitions, food waste hierarchy, and role in the circular economy. *Science of The Total Environment*, 706, 136033. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136033>
- Thompson, G. M. (2003). Labor scheduling: A commentary. *The Cornell Hotel and Restaurant Administration Quarterly*, 44(5), 149–155. [https://doi.org/10.1016/S0010-8804\(03\)90119-4](https://doi.org/10.1016/S0010-8804(03)90119-4)
- Tomazella, C. P., & Nagano, M. S. (2020). A comprehensive review of Branch-and-Bound algorithms: Guidelines and directions for further research on the flowshop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 158, 113556. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113556>

- Toth, P., & Vigo, D. (2002). An Overview of Vehicle Routing Problems. Em *The Vehicle Routing Problem* (pp. 1-23). SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications.
- Van den Bergh, J., Beliën, J., De Bruecker, P., Demeulemeester, E., & De Boeck, L. (2013). Personnel scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 226(3), 367–385. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.029>
- van der Werf, P., Seabrook, J. A., & Gilliland, J. A. (2020). Food for thought: Comparing self-reported versus curbside measurements of household food wasting behavior and the predictive capacity of behavioral determinants. *Waste Management*, 101, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.032>
- Van Engeland, J., Beliën, J., De Boeck, L., & De Jaeger, S. (2020). Literature review: Strategic network optimization models in waste reverse supply chains. *Omega*, 91, 102012. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.12.001>
- van Geffen, L., van Herpen, E., Sijtsema, S., & van Trijp, H. (2020). Food waste as the consequence of competing motivations, lack of opportunities, and insufficient abilities. *Resources, Conservation & Recycling: X*, 5, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100026>
- Vidal, T., Laporte, G., & Matl, P. (2019). A concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.10.010>
- Weaver, T., Mulder, M., Koppenhafer, L., Scott, K., & Liu, R. L. (2019). Diving in together or toes in the water: The interplay of community and nonprofit engagement in poverty alleviation. *Journal of Business Research*, 100, 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.12.030>
- Wei, D., & Oppenheim, A. V. (2013). A Branch-and-Bound Algorithm for Quadratically-Constrained Sparse Filter Design. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 61, 1006–1018. <https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2226450>
- Yang, X.-S. (Ed.). (2018). *Nature-Inspired Algorithms and Applied Optimization*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67669-2>

Yin, R. K. (2017). *Case Study Research and Applications: Design and Methods*. SAGE Publications.

Yoshimura, M., Fujimi, Y., Izui, K., & Nishiwaki, S. (2006). Decision-making support system for human resource allocation in product development projects. *International Journal of Production Research*, 44(5), 831–848. <https://doi.org/10.1080/00207540500272519>



## Anexos

### Anexo A: Descrição sucinta do Algoritmo *Branch-and-Bound*

O algoritmo B&B foi proposto em 1960 por Land e Doing, com o intuito de resolver problemas de programação linear inteira. É utilizado para obter soluções ótimas em problemas matemáticos e computacionais que se tornam impossíveis de resolver em tempo polinomial, isto é, não se resolvem de forma eficiente (Tomazella & Nagano, 2020).

Através do algoritmo B&B o problema apresentado é decomposto, construindo e explorando uma árvore de procura, onde o problema inicial é representado por um nó inicial, as possíveis soluções encontradas são designadas de nós folhas e os subproblemas originados do problema inicial são os nós internos. Neste contexto, Gmys et al. (2020) considera possível a divisão anteriormente referida através do uso de quatro operadores: ramificação (*branch*), limitação (*bound*), seleção e diminuição, cujas funções são:

- Operador ramificação – divide o problema em estudo em subproblemas menores disjuntos;
- Operador limitação – calcula os limites inferiores (quando se pretende minimizar) para se obter um custo/distância ótimo(a) de um subproblema;
- Operador diminuição – elimina os subproblemas que apresentam um limite inferior que excede o valor da melhor solução encontrada até ao momento;
- Operador seleção – o “caminho” ao longo da árvore é conduzido através deste operador, que devolve o próximo subproblema a ser processado de acordo com uma estratégia de procura (procura em profundidade, por exemplo).

O processo baseado na ramificação, como referido anteriormente, divide o problema inicial em subproblemas. Primeiramente o problema é dividido em dois subproblemas, estes se não forem resolvidos diretamente são subdivididos em mais dois subproblemas, e assim sucessivamente. A Figura A.1, ilustra uma árvore B&B, onde cada círculo caracteriza um subproblema e os rótulos em cada ramo indicam as variáveis fixadas de um nó para o outro. O número em cada círculo representa o limite inferior do valor da função objetivo associado àquele subproblema. Os subproblemas delimitados por círculos tracejados não precisam de ser considerados após se encontrar uma solução incumbente, ou seja, a melhor solução até ao momento, que neste caso representa um valor de 6 na função objetivo (Wei & Oppenheim, 2013).

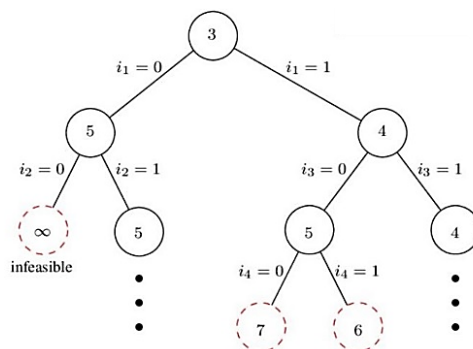


Figura A.1 - Exemplo de uma Árvore Branch-and-Bound

## **Anexo B: Questionário realizado aos voluntários que realizam rotas de recolha de alimentos na Re-food Almada**

### **Questionário Voluntários - Rotas de Recolha FCT em parceria com a REFOOD**

1. Estaria disponível a visitar mais do que um doador, no decorrer da sua rota?  
 Sim                       Não
2. Estaria disponível para ser alocado a uma rota, que não aquela que realiza atualmente?  
 Sim                       Não
3. Com que antecedência sabe a sua disponibilidade?  
 No dia anterior               Na semana anterior               No mês anterior
4. A sua disponibilidade costuma ser:  
 Fixa                       Variável
5. Que meio de transporte utiliza para realizar as rotas?  
 Carro                       Bicicleta                       A pé
6. Qual o seu ponto de partida para iniciar a rota?  
 Casa                       Trabalho                       Centro Operações
7. Em média, normalmente faz quantos quilómetros na realização da rota? R: \_\_\_\_\_
8. Até quantos quilómetros estaria disposto a fazer? R: \_\_\_\_\_

## Anexo C: Rotas de Veículos Atualmente Implementadas na ONG

Rota	Doador	Zona	2a-feira	3a-feira	4a-feira	5a-feira	6a-feira	Domingo
R1	A	Monte da Caparica	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	
R21	B	Charneca da Caparica	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	
R23	C	Almada						19:00
R20	D	Costa da Caparica					18:30	
R14	E	Laranjeiro	19:00	19:00	19:00	19:00		
R13	F	Almada		19:00	19:00			19:00
R12	G	Cova da Piedade	19:30	19:30	19:30			19:30
R11	H	Almada	19:00	19:00	19:00	19:00		
R4	I	Sobreda	19:30	19:30	19:30	19:30		
	J	Feijó	19:40	19:40	19:40	19:40		
	K	Feijó	19:45	19:45	19:45	19:45		19:45
R19	L	Feijó						19:45
R3	M	Cova da Piedade		19:50		19:50		
	N	Cova da Piedade				20:00		
R5	O	Almada			20:30			20:30
R24	P	Feijó		20:30		20:30		20:30
R6	K	Almada		20:55				
R17	R	Pragal	20:30	20:30	20:30	20:30		20:30
	S	Almada	21:00	21:00	21:00	21:00		21:00
	T	Almada	21:15	21:15	21:15	21:15		21:15
	U	Almada	21:25	21:25	21:25	21:25		21:25
	V	Almada	21:40	21:40	21:40	21:40		21:40
R8	W	Cova da Piedade	21:40	21:40	21:40			
R16	X	Almada	21:45	21:45	21:45	21:45		
	Y	Feijó	21:45	21:45	21:45	21:45		21:45
R9	Z	Feijó				22:00		22:00
	AA	Feijó	22:10	22:10	22:10	22:10		22:10
R15	BB	Cacilhas	22:00					
	CC	Cacilhas	22:15	22:15	22:15	22:15		22:15
	DD	Cova da Piedade		22:30	22:30	22:30		
	EE	Cova da Piedade	22:30	22:30	22:30	22:30		22:30
	FF	Cova da Piedade			22:30	22:30		
R7	GG	Feijó	22:30	22:30	22:30	22:30		22:30
R10	HH	Almada	22:30	22:30	22:30	22:30		22:30

## Anexo D: Formulário de Inscrição Re-food Almada



Nome: \_\_\_\_\_

Contato Telefónico: \_\_\_\_\_

Local de Residência: \_\_\_\_\_

E-mail: \_\_\_\_\_

Carta de Condução: Sim  Não

Viatura Própria: Sim  Não

Inscribe-se como:

Gestor (a)

Voluntário (a): Centro de Operações  Rotas

**Disponibilidade Semanal** (pode indicar mais do que uma):

	2ªfeira	3ªfeira	4ªfeira	5ªfeira	6ªfeira	Sábado	Domingo
18h - 20h							
20 - 22h							
22h - 24h							

**Informações Extra:**

Como gestor(a) poderá optar por uma das equipas disponíveis para participar de forma ativa nas decisões da Re-food Almada:

- **Apoio à Comunidade** – procura de potenciais parceiros, nomeadamente Juntas de Freguesia, empresas, etc.;
- **Beneficiários** – coordenação e listagem de famílias carenciadas;
- **Comunicação** – divulgação e organização de eventos;
- **Financeira** – organização e suporte financeiro do núcleo;
- **Fonte de Alimento** – identificação e ativação de todas as fontes de alimento em restaurantes, cafés, pastelarias, supermercados, etc.;
- **Operações** – gestão da logística do Centro de Operações;
- **Voluntários** – coordenação dos voluntários, horários e disponibilidade, etc.

## Anexo E: Implementação do modelo PLIM para o exemplo do VRPTW<sub>2</sub> no software CPLEX

Para a implementação do modelo foi necessário criar dois ficheiros: o ficheiro *.mod* em que será inserido o modelo na linguagem OPL e interpretado linha a linha, e o ficheiro *.dat* em que serão introduzidos os dados essenciais para a leitura do modelo. A entrada dos dados é feita separadamente uma vez que foi tido em consideração que os dados do problema poderão variar.

A entrada dos dados, através do ficheiro *.dat*, pode ser feita através do acesso a folhas de *Excel* ou através da inserção manual dos dados do problema. Ambas as formas serão utilizadas no problema em questão como poderá ser observado na Figura E.1.

No exemplo de aplicação foram tidos em consideração 3 veículos, 3 depósitos de origem (*DepositoL*, *DepositoM*, *DepositoR*) e 1 depósito de chegada (*ArmazemR*). Para efeitos do problema e por se assemelhar ao caso real, o *DepositoR* e o *ArmazemR*, são simultaneamente depósito de origem e de chegada. Durante a implementação do modelo no *software* e durante a leitura do mesmo, o CPLEX não reconhecia que o depósito em questão apresentava duas funções distintas, surgindo a necessidade de atribuir nomes diferentes ao mesmo depósito.

Todos os vértices envolvidos no exemplo em questão (depósitos e doadores), são englobados no conjunto denominado *Vertices*.

O tempo de serviço em cada vértice é dado pela matriz *Tempo de Serviço* onde os valores foram inseridos manualmente. Comparativamente aos valores utilizados na distância entre os vértices; tempo que um veículo demora a percorrer um arco entre dois vértices; constante *M* entre cada vértice; janela horária inferior e superior em que um veículo poderá visitar um doador ou sair/voltar dos depósitos, os valores a estes atribuídos são acedidos pelo modelo através da ligação a uma folha de *Excel*, neste caso dominada de *doc*. Na folha de *Excel* encontram-se as mesmas tabelas descritas na subsecção 4.1.2.

Os comentários em OPL são escritos após a ocorrência de um *//* numa linha, indicando ao *software* que qualquer texto deve ser ignorado.

```
nVeiculos=3; // número de veículos disponíveis para realizar as rotas
Vertices={"DepositoL","DepositoM","DepositoR","ArmazemR","Pao","Carne","Massa","Pizza"}; //vértices
Doadores={"Pao","Carne","Massa","Pizza"}; //doadores a visitar durante as rotas
Depositos={"DepositoL","DepositoM","DepositoR"};
TempoServico=[0,0,0,0,0.25,0.25,0.25,0.25]; //tempo de serviço em cada doador

SheetConnection sheet("doc.xlsx");
Distancia from SheetRead(sheet,"Dist"); //distancia entre todos os vértices
Tempo from SheetRead(sheet,"tempo"); //tempo a percorrer entre todos os vértices (depósitos e doadores)
JanelaInferior from SheetRead(sheet,"Inferior"); //o veículo deve chegar depois da janela horaria inferior
JanelaSuperior from SheetRead(sheet,"Superior"); //o veículo deve chegar antes da janela horaria superior
ConstanteM from SheetRead(sheet,"mij");

Hora to SheetWrite(sheet, "HoraResult");
```

Figura E.1 - Ficheiro *.dat* referente ao Exemplo de Aplicação

Após a inicialização de todas as variáveis no ficheiro *.dat*, seguiu-se a implementação do modelo no ficheiro *.mod*. Para modelar qualquer problema é fundamental conhecer quais os tipos primitivos e estruturas de dados mais básicas na linguagem OPL. Nesta linguagem existem três tipos primitivos que serão utilizados para declarar as variáveis:

- a) *Int*, variável tipo inteira;
- b) *Float*, variável tipo real;
- c) *String*, variável tipo texto.

De modo a que uma variável tenha o seu valor inicial atribuído, de acordo com a fonte de dados externa, é realizada uma atribuição utilizando as reticências, em vez de um valor. Com esta ação previne-se que apenas o ficheiro *.dat* sofra alterações aquando da mudança no problema.

Na Figura E.2 é possível visualizar a inicialização de todas as variáveis. Veja-se o exemplo: A variável *nVeiculos* é do tipo inteira e contém o conjunto de veículos disponíveis para realizar as rotas; a variável *Veiculos* assume um intervalo de valores compreendido entre 1 e o valor *nVeiculos*, que previamente foi definido no ficheiro de dados.

```
using CPLEX;

//Parâmetros
int nVeiculos=...;
range Veiculos=1..nVeiculos;
{string}Vertices=...;
{string}Doadores=...;
{string}Depositos=...;
float Distancia[Vertices][Vertices]=..
float Tempo[Vertices][Vertices]=...;
float TempoServico[Vertices]=...;
float JanelaInferior[Vertices]=...;
float JanelaSuperior[Vertices]=...;
float ValorM[Vertices][Vertices]=...;
```

Figura E.2 - Parâmetros no ficheiro *.mod* referente ao Exemplo de Aplicação

As variáveis de decisão, demonstradas na Figura E.3, são os valores de um número *n* de decisões que se pretendem tomar, pelo que não precisam de ser inicializadas em OPL. Uma das variáveis é do tipo *boolean*, isto é, binária, assumindo o valor zero ou um, tendo em consideração a restrição onde esteja inserida. A outra variável de decisão é do tipo *float+* pois pretende-se que o seu resultado assuma apenas valores positivos.

```
//Variáveis de Decisão
dvar boolean Visita[Vertices][Vertices][Veiculos];
//toma o valor 1 se o veiculo k visitar o doador j, imediatamente a seguir ao doador i, se não toma o valor 0
dvar float+ Hora[Vertices][Veiculos];
//especifica a hora (em decimal) que o veiculo k começa o serviço no vértice i
```

Figura E.3 - Variáveis de decisão no ficheiro *.mod* referente ao Exemplo de Aplicação

A função objetivo está interrelacionada com as variáveis de decisão e no caso em questão pretende-se minimizar o número de quilómetros a efetuar pelos veículos ao efetuarem as rotas de recolhas de alimentos, como observado na Figura E.4.

Na linguagem OPL usam-se algumas restrições lógicas que serão utilizadas na implementação do modelo, nomeadamente:

- a) E lógico, representado por `&&` ;
- b) Implicação, representado por `=>` ;
- c) Diferente de, representado por `!=` ;
- d) Igual a, representado por `==` ;

```
//Função Objetivo
minimize
sum(k in Veiculos, i in Vertices: i!= "ArmazemR", j in Vertices: j!= "DepositoL" && j!="DepositoM" && j!="DepositoR")
  Distancia[i][j]*Visita[i][j][k]; //minimiza a distancia total a percorrer por todos os veiculos
```

Figura E.4 - Função Objetivo no ficheiro.mod referente ao Exemplo de Aplicação

Após a introdução da função objetivo, segue-se a implementação das restrições compreendidas no modelo matemático em estudo. As restrições na linguagem OPL apresentam-se na Figura E.5 e na Figura E.6.

Finalizando a implementação do modelo, recorreu-se a um código de execução que imprimisse os resultados de modo a facilitar a leitura e compreensão das soluções geradas pela variável *Visita*, como exemplificado na Figura E.7.

```
//Restrições
subject to {
forall(d in Doadores)
  sum(k in Veiculos, j in Vertices: j!="DepositoL" && j!="DepositoM" && j!="DepositoR") Visita[d][j][k] == 1;
  //cada doador é visitado exatamente uma vez

forall(k in Veiculos)
  sum(d in Doadores, j in Vertices:j=="ArmazemR") Visita[d][j][k] <= 1;
  //garantir que cada veiculo chega ao armazem R

forall(d in Doadores, k in Veiculos)
  sum(i in Vertices:i!="ArmazemR") Visita[i][d][k] -
  sum(j in Vertices:j!="DepositoL" && j!="DepositoM" && j!="DepositoR") Visita[d][j][k] == 0;
  //garantir que o veiculo k quando chega ao doador d, prossegue para outro deposis

forall(k in Veiculos)
  sum(p in Depositos, d in Doadores) Visita[p][d][k] == sum(d in Doadores, j in Vertices:j=="ArmazemR") Visita[d][j][k];
  //garantir que todos os veiculos k que saíram dos depositos chegam ao armazem R

forall(k in Veiculos, i in Vertices:i!="ArmazemR", j in Vertices:j!="DepositoL" && j!="DepositoM" && j!="DepositoR")
  Hora[i][k] + TempoServico[i] + Tempo[i][j] - ValorM[i][j]*(1-Visita[i][j][k]) <= Hora[j][k];
  //hora a que o veiculo k começa o serviço no vértice i somado o tempo de serviço em i e ainda somando o tempo que demora de i a j,
  //tem que ser inferior à hora em que começa o serviço no vértice j

forall(k in Veiculos, i in Vertices:i!="ArmazemR")
  JanelaInferior[i] <= Hora[i][k];
  //garantir que a janela horária inferior do depósito e do doador é cumprida

forall(k in Veiculos, i in Vertices:i!="ArmazemR")
  JanelaSuperior[i] >= Hora[i][k];
  //garantir que a janela horária superior do depósito e do doador é cumprida
```

Figura E.5 - Restrições no ficheiro.mod referente ao Exemplo de Aplicação

```

forall(k in Veiculos, j in Vertices: j== "ArmazemR", i in Vertices: i== "DepositoL")
  Hora[j][k]-Hora[i][k]<=1;
  // garantir que a rota tem duração máxima de 1h

forall(k in Veiculos, j in Vertices: j== "ArmazemR", i in Vertices: i== "DepositoM")
  Hora[j][k]-Hora[i][k]<=1;
  // garantir que a rota tem duração máxima de 1h

forall(k in Veiculos, j in Vertices: j== "ArmazemR", i in Vertices: i== "DepositoR")
  Hora[j][k]-Hora[i][k]<=1;
  // garantir que a rota tem duração máxima de 1h
}

```

Figura E.6 - Restrições no *ficheiro.mod* referente ao Exemplo de Aplicação (cont.)

```

//Pós-Processamento dos Dados
execute RESULTADOS {
  writeln ("Rotas");
  for (var i in Vertices) {
    for (var j in Vertices) {
      for (var k in Veiculos) {
        if (Visita[i][j][k]>0){
          writeln (Visita[i][j][k]+" "+"o veiculo"+" "+k+" "+"visita"+" "+i+" "+"e depois visita"+" "+j);
        }
      }
    }
  }
}
}

```

Figura E.7 - Pós-Processamento dos dados no *ficheiro.mod* referente ao Exemplo de Aplicação

Para registrar os resultados provenientes da variável de decisão *Hora*, foi dada a indicação no *ficheiro.dat* que era desejado que os valores aparecessem na folha de *Excel* (Figura E.8). O mesmo não se sucedeu com a variável *Visita* visto que esta apresenta três índices, criando uma incompatibilidade e não percepção para com o *Excel*.

```

Hora to SheetWrite(sheet, "HoraResult");
//valores atribuídos à variável de decisão "Hora", transcritos para a folha de Excel

```

Figura E.8 - Pós-Processamento dos dados no *ficheiro.dat* referente ao Exemplo de Aplicação

## Anexo F: Excerto dos dados fornecidos ao modelo de PLIM para o dia de domingo

No domingo as rotas a serem geradas devem ter em consideração a doação de 19 doadores. Nas tabelas seguintes são apresentados os dados para apenas 8 doadores. A Tabela F.1 demonstra as distâncias entre doadores e entre os depósitos; a Tabela F.2 as janelas horárias em que cada doador deve ser visitado; a Tabela F.3 os tempos a percorrer entre doadores e entre depósitos e na Tabela F.4 está representada a contante M entre cada vértice.

Tabela F.1 - Distâncias entre vértices com 8 doadores no domingo

	DoadorC	DoadorF	DoadorG	DoadorK	DoadorL	DoadorO	DoadorP	DoadorR	RefoodFim	Refood	Rotunda	Pragal
DoadorC		1	2	5	6	2	5	2	6			
DoadorF	1		0,618	4	5	0,719	4	2	5			
DoadorG	2	1		3	4	2	3	2	4			
DoadorK	4	3	3		2	4	0,613	3	0,931			
DoadorL	6	5	4	2		5	1	5	2			
DoadorO	0,757	0,595	0,975	4	5		4	3	5			
DoadorP	5	4	3	0,619	1	4		4	1			
DoadorR	3	2	2	3	5	2	4		5			
RefoodFim												
Refood	5	4	4	0,564	2	4	0,783	4				
Rotunda	5	4	4	3	4	4	3	3				
Pragal	6	5	5	4	5	4	4	3				

Tabela F.2 - Janelas horárias para 8 doadores e depósitos no domingo

	DoadorC	DoadorF	DoadorG	DoadorK	DoadorL	DoadorO	DoadorP	DoadorR	RefoodFim	Refood	Rotunda	Pragal
$a_i$	19,00	19,00	19,00	18,00	19,50	20,00	20,50	20,00	17,50	17,50	17,50	17,50
$b_i$	21,00	21,00	21,00	20,00	20,00	22,00	21,00	22,00	23,92	23,92	23,92	23,92

Tabela F.3 - Tempo a percorrer entre vértices com 8 doadores no domingo

	DoadorC	DoadorF	DoadorG	DoadorK	DoadorL	DoadorO	DoadorP	DoadorR	RefoodFim	Refood	Rotunda	Pragal
DoadorC		0,07	0,08	0,17	0,22	0,10	0,17	0,10	0,22			
DoadorF	0,05		0,02	0,12	0,17	0,03	0,12	0,10	0,17			
DoadorG	0,08	0,05		0,08	0,13	0,07	0,08	0,07	0,13			
DoadorK	0,15	0,12	0,10		0,07	0,13	0,02	0,12	0,05			
DoadorL	0,18	0,15	0,15	0,05		0,17	0,03	0,15	0,08			
DoadorO	0,03	0,03	0,05	0,15	0,18		0,15	0,12	0,18			
DoadorP	0,15	0,12	0,10	0,02	0,03	0,13		0,12	0,05			
DoadorR	0,12	0,10	0,07	0,12	0,15	0,08	0,12		0,15			
RefoodFim												
Refood	0,18	0,15	0,13	0,03	0,08	0,17	0,03	0,15				
Rotunda	0,12	0,10	0,08	0,07	0,10	0,10	0,07	0,08				
Pragal	6	5	5	4	5	4	4	3				

Tabela F.4 - Constante M entre vértices com 8 doadores no domingo

	DoadorC	DoadorF	DoadorG	DoadorK	DoadorL	DoadorO	DoadorP	DoadorR	RefoodFim	Refood	Rotunda	Pragal
DoadorC		2,32	2,33	3,42	1,97	1,35	0,92	1,35	3,97			
DoadorF	2,30		2,27	3,37	1,92	1,28	0,87	1,35	3,92			
DoadorG	2,33	2,30		3,33	1,88	1,32	0,83	1,32	3,88			
DoadorK	1,40	1,37	1,35		0,82	0,38	-0,23	0,37	2,80			
DoadorL	1,43	1,40	1,40	2,30		0,42	-0,22	0,40	2,83			
DoadorO	3,28	3,28	3,30	4,40	2,93		1,90	2,37	4,93			
DoadorP	2,40	2,37	2,35	3,27	1,78	1,38		1,37	3,80			
DoadorR	3,37	3,35	3,32	4,37	2,90	2,33	1,87		4,90			
RefoodFim												
Refood	5,10	5,07	5,05	5,95	4,50	4,08	3,45	4,07				
Rotunda	5,03	5,02	5,00	5,98	4,52	4,02	3,48	4,00				
Pragal	5,07	5,03	5,03	6,00	4,55	4,05	3,50	4,00				

## Anexo G: Rotas Reestruturadas na Re-food Almada

Neste anexo estão detalhadas as rotas de recolha de alimentos a serem efetuadas pelos voluntários. A cada rota corresponde um veículo e apenas um voluntário.

### Anexo G1: Rotas de Recolha para Segunda-feira

	Rota1	Rota2	Rota3	Rota4	Rota5	Rota6	Rota7	Rota8	Rota9	Rota 10
DoadorA										17:36
DoadorB										18:00
DoadorE					21:09					
DoadorG				21:00						
DoadorH									18:30	
DoadorI								19:42		
DoadorJ									18:51	
DoadorK									18:09	
DoadorR			21:45							
DoadorS								21:27		
DoadorT								21:03		
DoadorU						20:45				
DoadorV						21:00				
DoadorW				21:30						
DoadorX						21:21				
DoadorY								20:12		
DoadorAA					20:48					
DoadorBB	22:06									
DoadorCC		21:54								
DoadorEE		22:18								
DoadorGG	22:24									
DoadorHH			22:09							
RefoodFim	22:48	22:45	22:40	21:54	21:42	21:42	21:54	20:30	19:06	18:30
Refood					20:42			19:30	18:06	
Rotunda	21:48	21:45	21:40	20:54		20:42	20:54			
Pragal										17:30

Nas Figuras a seguir apresentadas, é possível visualizar o percurso a realizar pelos 10 voluntários que posteriormente serão afetos às 10 rotas, definidas para a segunda-feira. O símbolo X, em cada figura, representa o ponto de partida para cada rota.



Figura G.1 - Rota1 de segunda-feira





Figura G.4 - Rota4 de segunda-feira

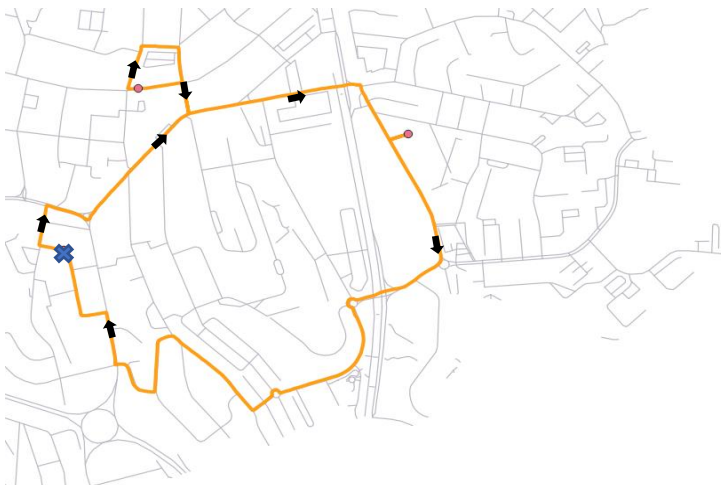


Figura G.5 - Rota5 de segunda-feira









## Anexo G2: Rotas de Recolha para Terça-feira

	Rota1	Rota2	Rota3	Rota4	Rota5	Rota6	Rota7	Rota8	Rota9	Rota10	Rota11
DoadorA	17:36										
DoadorB	18:00										
DoadorE									19:07		
DoadorF					18:21						
DoadorG					18:37						
DoadorH									18:48		
DoadorI		18:27									
DoadorJ		18:03									
DoadorK									18:28		
DoadorM					18:04						
DoadorP						20:33					
DoadorQ							20:31				
DoadorR			20:04								
DoadorS											20:07
DoadorT			20:30								
DoadorU							20:48				
DoadorV							21:05				
DoadorW											20:30
DoadorX										20:24	
DoadorY						20:57					
DoadorAA										20:06	
DoadorCC				22:04							
DoadorDD				22:21							
DoadorEE				22:37							
DoadorGG								22:30			
DoadorHH								22:09			
RefoodFim	18:30	19:00	21:00	23:00	19:00	21:30	21:30	23:00	19:27	21:00	21:00
Refood		18:00				20:30	20:30		18:27	20:00	
Rotunda				22:00	18:00			22:00			20:00
Pragal	17:30		20:00								

### Anexo G3: Rotas de Recolha para Quarta-feira

	Rota1	Rota2	Rota3	Rota4	Rota5	Rota6	Rota7	Rota8	Rota9	Rota10	Rota11	Rota12
DoadorA					17:36							
DoadorB					18:00							
DoadorE				19:03								
DoadorF									20:33			
DoadorG											20:18	
DoadorH				18:30								
DoadorI						19:40						
DoadorJ						19:21						
DoadorK							19:54					
DoadorO									20:00			
DoadorR							20:18					
DoadorS									20:16			
DoadorT										20:16		
DoadorU											20:00	
DoadorV			21:48									
DoadorW										20:18		
DoadorX										20:39		
DoadorY						20:00						
DoadorAA												21:57
DoadorCC	22:00											
DoadorDD		22:00										
DoadorEE		22:18										
DoadorFF	22:30											
DoadorGG												22:30
DoadorHH			22:12									
RefoodFim	22:54	22:42	22:42	19:24	18:30	20:18	20:51	20:45	20:57	21:00	20:42	22:55
Refood							19:51					
Rotunda						19:18						21:55
Pragal	21:54	21:42	21:42	18:24	17:30			19:45	19:57	20:00	19:42	

### Anexo G4: Rotas de Recolha para Quinta-feira

	Rota1	Rota2	Rota3	Rota4	Rota5	Rota6	Rota7	Rota8	Rota9	Rota10	Rota11
DoadorA				17:36							
DoadorB				18:00							
DoadorE								20:16			
DoadorH									19:00		
DoadorI		19:54									
DoadorJ											18:54
DoadorK											18:27
DoadorM					20:00						
DoadorN									18:30		
DoadorP		20:30									
DoadorR	20:30										
DoadorS	20:00										
DoadorT					20:19						
DoadorU								20:00			
DoadorV								20:16			
DoadorX								20:36			
DoadorY		20:12									
DoadorZ								20:00			
DoadorAA								20:36			
DoadorCC										22:07	
DoadorDD										22:24	
DoadorEE						22:00					
DoadorFF						22:18					
DoadorGG			22:30								
DoadorHH			22:00								
RefoodFim	20:54	20:48	22:48	18:30	20:48	22:36	20:54	20:54	19:21	23:00	19:24
Refood		19:48						19:54			18:24
Rotunda	19:54		21:48		19:48	21:36	19:00		18:21	22:00	
Pragal				17:30							

**Anexo G5: Rotas de Recolha para Sexta-feira**

	<b>Rota1</b>	<b>Rota2</b>
DoadorA	17:36	
DoadorB	18:00	
DoadorD		18:30
RefoodFim	18:30	18:59
Refood		
Rotunda		
Pragal	17:30	17:59

## Anexo G6: Rotas de Recolha para Domingo

	Rota1	Rota2	Rota3	Rota4	Rota5	Rota6	Rota7	Rota8
DoadorC				20:33				
DoadorF						20:00		
DoadorG						20:18		
DoadorK								19:21
DoadorL								19:42
DoadorO							20:00	
DoadorP						20:36		
DoadorR		20:24						
DoadorS				20:12				
DoadorT							20:18	
DoadorU		20:06						
DoadorV					20:00			
DoadorY								20:00
DoadorZ					20:37			
DoadorAA					20:21			
DoadorDD	22:00							
DoadorEE	22:30							
DoadorGG			22:30					
DoadorHH			22:00					
RefoodFim	22:54	20:54	22:54	20:54	20:54	20:54	20:42	20:18
Refood								19:18
Rotunda	21:54	19:54	21:54	19:54	19:54	19:54	19:42	
Pragal								

## Anexo H: Implementação do modelo PLI para o exemplo do PAG no *software* CPLEX

Para o modelo de PLI referente ao PAG, foram criados dois ficheiros: o ficheiro.mod (Figura H.1) e o ficheiro.dat (Figura H.2).

```
//Parâmetros
{string}Rotas=...;
{string}Voluntarios=...;
int RotasPossiveis [Voluntarios][Rotas]=...;
int Preferencias [Voluntarios][Rotas]=...;

//Variáveis de Decisão
dvar boolean Afetacao [Voluntarios][Rotas];
//toma o valor 1 se o voluntário i for afetado à rota j

//Função Objetivo
maximize
    sum (i in Voluntarios, j in Rotas)
        Afetacao[i][j]*RotasPossiveis[i][j]*Preferencias[i][j];
//maximiza as preferências dos voluntários para iniciar a rota em determinado
//depósito, tendo em consideração as rotas que os mesmos poderão realizar

//Restrições
subject to{
    forall (j in Rotas)
        sum (i in Voluntarios)
            Afetacao[i][j]*RotasPossiveis[i][j]==1;
//garantir que a todas as rotas é afetado um voluntário

    forall (i in Voluntarios)
        sum (j in Rotas)
            Afetacao[i][j]*RotasPossiveis[i][j]<=1;
// garantir que os voluntários são afetos a uma rota no máximo
}
```

Figura H.1 - Ficheiro .mod referente ao Exemplo de Aplicação no PAG

```
Rotas={"RotaA1","RotaA2","RotaA3","RotaA4","RotaA5","RotaA6","RotaB1","RotaB2","RotaB3","RotaB4","RotaB5","RotaB6","RotaB7"};
//rotas a realizar
Voluntarios={"Ana","Maria","João","Carla","Dinis","Nuno","Rosa","Filipa","Julia","Pedro","Rui","Paula","Filipe","Elio","Alana","Sara"};
//voluntários a afetar às rotas para que estes as possam realizar

SheetConnection sheet("Livro.xlsx");
RotasPossiveis from SheetRead (sheet, "rotas");
//rotas possíveis de realizar pelos voluntários, considerando a sua disponibilidade e o início da rota
Preferencias from SheetRead (sheet, "preferencias");
//preferencias definidas pelos voluntários para começar a rota em determinado depósito considerando o depósito de início da rota

Afetacao to SheetWrite(sheet, "Afet"); //resultado da função objetivo
```

Figura H.2 - Ficheiro .dat referente ao Exemplo de Aplicação no PAG