

Cross-docking colaborativo nas cadeias de abastecimento alimentares

Ana João Pinheiro Lopes

Dissertação de Mestrado

Orientadora: Doutora Maria João Santos



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

2021-06-28

À memória do meu avô.

Resumo

O transporte é uma componente essencial de qualquer cadeia de abastecimento e é responsável por uma grande parte dos custos operacionais das organizações. A implementação de estratégias colaborativas, nomeadamente na distribuição dos produtos, tem emergido como uma oportunidade de redução de custos para as empresas que buscam continuamente uma melhoria da eficiência das suas operações. Motivado por um caso de estudo de uma cadeia de abastecimento alimentar, o presente trabalho surge com o objetivo de analisar o potencial do transporte colaborativo num caso de colaboração lateral entre um retalhista, um operador logístico e vários fornecedores.

Tendo em conta este objetivo, desenvolveu-se um modelo matemático capaz de resolver o problema de definição de rotas com *cross-docking* colaborativo entre as empresas. Nesta estratégia, os fornecedores conseguem reduzir as distâncias viajadas, entregando os seus produtos num ponto de *cross-docking*. Na formulação do problema incluíram-se três funções objetivo diferentes, de forma a compararem-se várias soluções e a perceber-se o seu impacto económico e ambiental. Foram, também, realizadas análises de sensibilidade a diversos parâmetros do problema, com o intuito de se perceber de que forma estes influenciam as soluções obtidas. Para a alocação dos ganhos resultantes da colaboração pelos diversos participantes, aplicaram-se três métodos de partilha de benefícios da literatura, procurando-se o método que conduzisse a uma distribuição de lucros o mais justa possível.

Verificou-se que a estratégia colaborativa reduz o consumo global de combustível e os custos operacionais da rede de distribuição em cerca de 14% e 2%, respetivamente. Além disso, a estratégia de *cross-docking* colaborativo revelou-se vantajosa para todos os fornecedores considerados no problema.

Palavras-Chave: Transporte Colaborativo, Colaboração Lateral, *Cross-docking*, *Backhauling*, *Vehicle Routing Problem*, Partilha de Benefícios, Métodos Proporcionais, Impacto Ambiental.

Collaborative cross-docking in food supply chains

Abstract

Transportation is an essential component of any supply chain and is responsible for a large part of companies' operational costs. The implementation of collaborative strategies, namely in the distribution of products, has appeared as an opportunity for cost reduction in companies that continuously seek for the improvement of efficiency in their operations. Motivated by a case study of a food supply chain, this work emerges with the goal of analyzing the potential of collaborative transportation in a case with lateral cooperation between a retailer, a third-party logistics provider and several suppliers.

With this goal, a mathematical model was developed that can solve the problem of vehicle routing with collaborative cross-docking between companies. In this strategy, the suppliers can reduce their travel distances by delivering their products at a cross-docking point. To formulate the problem, three different objective functions were considered to compare various solutions and understand their economic and environmental impact. Sensitivity analyses were also performed to various parameters with the objective of understanding how they influenced the solutions that were found. Relative to the allocation of profits to the different entities, three profit-sharing methods from the literature were evaluated in search of the one that led to the fairest distribution of profits.

It was observed that the collaborative strategy reduced the total fuel consumption and operational costs of the distribution network in 14% and 2% respectively. Furthermore, the collaborative cross-docking strategy has proven to be beneficial for all the suppliers considered in the problem.

Key Words: Collaborative Transportation, Lateral Collaboration, Cross-docking, Backhauling, Vehicle Routing Problem, Profit Allocation, Proportional Methods, Environmental Impact.

Agradecimentos

Esta dissertação é o resultado de meses de trabalho, pelo que agradeço a todos que, de alguma forma, me ajudaram e acompanharam neste percurso.

À Doutora Maria João Santos, pelo apoio, acompanhamento e disponibilidade para responder a todas as minhas dúvidas. A sua orientação e dedicação ajudaram-me a ultrapassar os piores obstáculos deste trabalho.

À Doutora Sara Sofia Martins, coorientadora do projeto, por todos os conhecimentos transmitidos e pela ajuda imprescindível.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto por me proporcionar um ensino de qualidade, e a todos os docentes e colaboradores do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica que contribuíram para a minha formação e me inspiraram com a sua sabedoria.

Aos meus amigos, por todo o apoio e companheirismo, e pela motivação nos momentos mais difíceis. Sem eles, esta caminhada teria sido muito mais complicada.

À minha família, por estarem sempre presentes, por nunca duvidarem das minhas capacidades e por caminharem sempre ao meu lado.

À minha mãe, por ser o meu maior apoio e por tornar possível a concretização de todos os meus sonhos. Por lutar sempre pelo meu sucesso e pela minha felicidade. Pela sinceridade, pela ajuda, pela dedicação e pelo amor incondicional.

Ao meu avô, por todos os ensinamentos e valores transmitidos. Pela exigência, pelos sacrifícios, pela bondade e por ser um exemplo de resiliência e superação. Ao meu avô, por ser a minha inspiração.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Contextualização e Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da dissertação	3
2	Estado da Arte.....	4
2.1	Cadeia de Abastecimento	4
2.2	O Transporte e o Desafio da Distribuição	5
2.3	Vehicle Routing Problem.....	6
2.3.1	Periodic Vehicle Routing Problem (PVRP)	8
2.3.2	Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem (HFVRP).....	8
2.3.3	Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB)	9
2.3.4	Pollution Routing Problem (PRP).....	9
2.4	Transporte Colaborativo.....	10
2.4.1	<i>Cross-docking</i> Colaborativo.....	11
2.4.2	Profit Sharing Problem.....	12
3	Definição do Problema	14
3.1	Caracterização do Cenário Atual	14
3.2	Descrição da Estratégia Colaborativa	15
3.3	Recolha de Dados.....	16
4	Solução Proposta.....	19
4.1	Descrição do Modelo Matemático	19
4.2	Implementação do Modelo	23
4.3	Partilha de Benefícios	24
5	Análise dos Resultados Obtidos	25
5.1	Análise da Solução Colaborativa	26
5.2	Análises de Sensibilidade	28
5.2.1	Impacto do Custo de <i>Cross-docking</i>	29
5.2.2	Impacto do Custo de <i>Outsourcing</i>	30
5.2.3	Variação da Procura	32
5.2.4	Variação da Quantidade de Produtos Entregue pelos Fornecedores.....	35
5.2.5	Impacto do Custo Variável de Transporte.....	36
5.3	Performance dos Métodos de Partilha de Benefícios	38
6	Conclusões e Trabalho Futuro	42
	Referências	44

Siglas e Abreviaturas

CA	Cadeia de Abastecimento
CSCMP	<i>Council of Supply Chain Management</i>
CVRP	<i>Capacitated Vehicle Routing Problem</i>
FCR	<i>Fuel Consumption Rate</i>
FO(E)	Função Objetivo Económica
FO(A)	Função Objetivo Ambiental
FO(EA)	Função Objetivo Económica e Ambiental
GEE	Gases de Efeito de Estufa
HFVRP	<i>Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem</i>
MP1	Método de Partilha 1
MP2	Método de Partilha 2
MP3	Método de Partilha 3
OL	Operador Logístico
PRP	<i>Pollution Vehicle Routing Problem</i>
PVRP	<i>Periodic Vehicle Routing Problem</i>
R	Retalhista
RVRP	<i>Rich Vehicle Routing Problem</i>
SCM	<i>Supply Chain Management</i>
SV	<i>Shapley Value</i>
VRP	<i>Vehicle Routing Problem</i>
VRPB	<i>Vehicle Routing Problem with Backhauls</i>

Índice de Figuras

Figura 1 - Representação do VRP clássico (Fonte: Alizadeh Foroutan et al., 2020).	7
Figura 2 - VRP associado ao cenário sem colaboração.	15
Figura 3 - VRP associado ao cenário com <i>cross-docking</i> colaborativo.	16
Figura 4 - Gráfico relativo ao impacto de cd na redução dos custos operacionais.	29
Figura 5 - Gráfico relativo ao impacto de cd na redução do consumo de combustível.	30
Figura 6 - Gráfico relativo ao impacto de cd no nº de fornecedores participantes na colaboração.	30
Figura 7 - Gráfico relativo ao impacto de co na redução dos custos operacionais.	31
Figura 8 - Gráfico relativo ao impacto de co na redução do consumo de combustível.	31
Figura 9 - Gráfico relativo ao impacto de co no nº de fornecedores participantes na colaboração.	32
Figura 10 - Gráfico relativo ao impacto da procura das lojas no nº de veículos utilizados.	33
Figura 11 – Comparação entre a instância base e o caso 4 relativamente ao impacto da procura das lojas no nº de veículos utilizados.	35
Figura 12 - Gráfico relativo ao impacto da variação das quantidades entregues pelos fornecedores nos custos operacionais.	35
Figura 13 - Gráfico relativo ao impacto da variação das quantidades entregues pelos fornecedores no consumo de combustível.	36
Figura 14 - Gráfico relativo ao nº de veículos de cada tipo utilizados na instância base.	37
Figura 15 - Gráfico relativo ao nº de veículos de cada tipo utilizados quando o custo variável é proporcional à capacidade do veículo.	38

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Distâncias euclidianas entre os fornecedores e os entrepostos.....	17
Tabela 2 - Quantidades médias de paletes entregues pelos fornecedores	17
Tabela 3 - Quantidades de procura diária média de cada loja.	18
Tabela 4 - Ficheiros de instâncias gerados.	24
Tabela 5 - Características dos veículos.	25
Tabela 6 - Parâmetros associados a custos e consumos utilizados no modelo.	25
Tabela 7 - Calendarização das entregas dos fornecedores ao longo de um mês.	26
Tabela 8 - Resultados obtidos para a semana 1.	27
Tabela 9 - Resultados obtidos para a semana 2 e 4.	27
Tabela 10 - Resultados obtidos para a semana 3.	27
Tabela 11 - Resultados obtidos para a semana 1, sem o fornecedor que realiza entregas sazonais.	27
Tabela 12 - Resultados obtidos para o Caso 1 - procura diária a 50%.	32
Tabela 13 - Resultados obtidos para o Caso 2 - procura diária a 75%	33
Tabela 14 - Resultados obtidos para o Caso 3 - procura diária a 117%	33
Tabela 15 - Resultados obtidos para o Caso 4 - procura decrescente.....	34
Tabela 16 - Custos a suportar por cada uma das entidades em cada um dos cenários.....	39
Tabela 17 - Resultados obtidos com o MP1.	39
Tabela 18 - Resultados obtidos com o MP3.	40
Tabela 19 - Resultados obtidos com a imposição de tetos de 100% no MP3.....	41
Tabela 20 - Resultados obtidos com a imposição de tetos no MP3.	41

1 Introdução

A complexidade da economia moderna, influenciada pela rápida evolução da tecnologia e dos sistemas de informação e por consumidores cada vez mais exigentes, trouxe novos desafios às organizações. A volubilidade do mercado atual tem igualmente contribuído para este aumento de complexidade operacional. As empresas deparam-se com a dificuldade de resposta a ciclos de pedidos mais curtos, com tempos de entrega cada vez mais reduzidos, que nem sempre se consegue aliar a uma rede de distribuição eficaz, que vise a minimização de custos, tanto econômicos como ambientais, sem o prejuízo da satisfação do cliente. Várias soluções têm-se focado na união de esforços entre as várias entidades da cadeia de abastecimento, de forma a potenciar a eficiência através da integração de serviços, possibilitando uma redução de custos para as duas ou mais partes envolvidas (Christopher, 2011).

No setor agroalimentar, a distribuição dos produtos pelos diversos clientes representa uma porção significativa dos custos operacionais. Neste contexto, a cooperação logística emerge como uma oportunidade de redução de custos, com a implementação de sinergias entre várias empresas que possam partilhar recursos, como é o caso da partilha de veículos (Santos et al., 2021). Apesar do transporte colaborativo ser um tópico cada vez mais explorado na literatura, a possibilidade de se utilizar entidades intermediárias para a realização de *cross-docking* de mercadorias provenientes de fornecedores e destinadas ao retalhista é uma estratégia colaborativa ainda pouco abordada. Este projeto surge, então, com o intuito de analisar o potencial de colaboração entre um grande retalhista e um conjunto de fornecedores, com recurso a um operador logístico que funcionará como ponto de *cross-docking*. O trabalho desenvolvido centra-se num caso de estudo na cadeia de abastecimento alimentar, realizado em colaboração com empresas do setor, não se descurando, contudo, a definição de um problema que possa ser aplicado a qualquer outra indústria.

1.1 Contextualização e Motivação

Num setor alimentar cada vez mais competitivo e global, a busca por elevados níveis de eficiência torna-se cada vez mais desafiante. As empresas desta área procuram constantemente novas estratégias para melhorarem o seu desempenho e garantirem a sua competitividade no mercado. A crescente exigência dos consumidores, aliada aos desafios de um desenvolvimento sustentável, pressionam as organizações a serem cada vez mais rigorosas na gestão das suas operações logísticas, nomeadamente no que diz respeito à distribuição dos produtos (Aloui et al., 2020).

O transporte é uma das principais integrantes de qualquer cadeia de abastecimento (Muñoz-Villamizar et al., 2019). No caso específico de produtos perecíveis, o transporte assume um papel ainda mais relevante, pois um sistema de distribuição ineficiente traduz-se na perda de valor dos produtos transportados e, conseqüentemente, na diminuição da rentabilidade da empresa. Segundo Swenseth e Godfrey (2002), a distribuição dos produtos representa frequentemente a maior porção do preço pago pelos consumidores, atingindo por vezes cerca de 50%

da totalidade de custos logísticos. Como tal, a minimização dos custos associados ao transporte assume uma relevância crescente na gestão de cadeias de abastecimento alimentares, sendo os problemas de planeamento de rotas de veículos (*Vehicle Routing Problem* - VRP) amplamente abordados no âmbito de investigação operacional.

Em termos de impacto ambiental, o transporte de mercadorias é responsável por cerca de 14% do total de emissões mundiais de CO₂, onde 75% corresponde apenas ao transporte rodoviário (G. Liu et al., 2020). Numa época em que se tem intensificado a legislação reguladora de emissões de gases poluentes, a procura pela sustentabilidade através de práticas logísticas verdes é condição essencial para que as empresas continuem a garantir uma vantagem competitiva (Danloup et al., 2015). Visto que o transporte representa uma fatia significativa do impacto ambiental geral de uma cadeia de abastecimento (McKinnon & Edwards, 2010), é manifesta a necessidade de se definir uma solução de VRP eficaz e sustentável, tanto económica como ambientalmente.

Neste contexto, o transporte colaborativo surge como uma oportunidade de melhoria de sustentabilidade, bem como de minimização de custos, através da implementação de sinergias entre empresas. Na logística colaborativa, as organizações intervenientes pretendem identificar custos relacionados com operações que não podem ser geridas individualmente, mas que poderão ser reduzidos coletivamente (Santos et al., 2021). A problemática das viagens em vazio é um dos pontos mais considerados. Estima-se que cerca de 25% dos quilómetros viajados na União Europeia são realizados por veículos que transportam apenas carga parcial ou que circulam sem qualquer carga (Venkataraman & Pinto, 2018). Rentabilizar a capacidade dos veículos e reduzir as viagens em vazio, principalmente as viagens de retorno (*backhauling*), têm sido alguns dos principais objetivos do plano de distribuição sustentável desenvolvido em vários países da Europa, como é o caso do Reino Unido (McKinnon & Edwards, 2010).

A literatura existente analisou, sobretudo, os benefícios da colaboração e o seu impacto no desempenho das operações logísticas, no entanto há estratégias colaborativas com bastante potencial de crescimento que ainda não foram muito exploradas, como é o caso do *cross-docking* colaborativo. A maioria dos casos abordados na literatura prendem-se com situações de colaboração horizontal, em que todos os participantes estão no mesmo nível da cadeia de abastecimento. Existe, também, alguma pesquisa, ainda que menos significativa, sobre casos de colaboração vertical, ou seja, entre empresas que assumem níveis hierárquicos diferentes. Por sua vez, o presente trabalho aborda um caso de colaboração lateral, que combina serviços de transporte equivalentes (colaboração horizontal) e serviços de transporte complementares (colaboração vertical), diferenciando-se, assim, da maioria das investigações feitas até à data.

1.2 Objetivos

O principal objetivo da presente dissertação é investigar os benefícios económicos e ambientais do planeamento de transporte colaborativo entre um retalhista, os seus fornecedores e um operador logístico que servirá de ponto de *cross-docking*. Pretende-se que o trabalho de pesquisa contribua para o desenvolvimento de novas abordagens de transporte colaborativo, avaliando o impacto das sinergias criadas entre empresas de diferentes níveis da cadeia de abastecimento alimentar, quer do ponto de vista económico, quer do ponto de vista ambiental.

Definem-se as seguintes etapas da metodologia aplicada para se alcançarem os objetivos descritos:

- Elaboração de uma revisão de literatura focada em problemas de transporte colaborativo e *cross-docking*;
- Caracterização geral das entidades envolvidas na colaboração e recolha de dados necessários ao desenvolvimento de um modelo e cenários de VRP com *cross-docking* colaborativo entre as empresas;
- Desenvolvimento de um modelo matemático capaz de resolver o problema de transporte colaborativo com *cross-docking*;
- Análise do impacto económico e ambiental de diferentes soluções do problema;
- Determinação dos valores de sinergia obtidos com a colaboração e os benefícios individuais de cada entidade.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é constituída por seis capítulos principais, subdivididos em subcapítulos.

Neste primeiro capítulo, é feito o enquadramento do projeto, apresentando-se os aspetos que motivaram a sua realização, e enumeram-se os principais objetivos e a metodologia usada.

No capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica sobre o papel do transporte numa cadeia de abastecimento, os problemas de definição de rotas e algumas das suas vertentes, o transporte colaborativo e o problema de partilha de benefícios.

O capítulo 3 é dedicado à definição do problema, apresentando-se o cenário ilustrativo da situação atual do caso em estudo, e o cenário relativo à estratégia colaborativa abordada, bem como os dados recolhidos necessários à sua caracterização.

No capítulo 4, é proposta uma solução para a resolução do problema. Primeiro, apresenta-se o modelo matemático desenvolvido para a resolução do *Vehicle Routing Problem* e, posteriormente, expõem-se os métodos de partilha de benefícios aplicados no *Profit Sharing Problem*.

No capítulo 5, são analisados os resultados obtidos, comparando-se o cenário colaborativo com o cenário atual. Adicionalmente, realizam-se análises de sensibilidade a alguns dos parâmetros do problema, para se perceber qual o seu impacto nas soluções alcançadas, e avalia-se a performance dos métodos de partilha de benefícios estudados.

Por fim, no capítulo 6, apresentam-se as principais conclusões deste trabalho e identificam-se algumas direções de investigação futura.

2 Estado da Arte

Neste capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica dos temas abordados ao longo da dissertação e a respetiva fundamentação teórica dos conceitos expostos. A revisão focou-se no transporte de mercadorias, na sua importância numa cadeia de abastecimento e no seu potencial colaborativo.

Assim, a primeira secção (2.1) aborda a temática das Cadeias de Abastecimento, introduzindo o conceito de Gestão da Cadeia de Abastecimento e distinguindo os diversos tipos de planeamento com base nos níveis de decisão. Na secção 2.2 faz-se um enquadramento do transporte na cadeia de abastecimento, dando-se especial atenção ao transporte rodoviário. Seguidamente, na secção 2.3 aborda-se o problema de distribuição de rotas, onde se caracteriza o problema clássico, bem como as suas variantes mais pertinentes para a realização do presente trabalho. Finalmente, na secção 2.4 explora-se o transporte colaborativo e vários tipos de colaboração, destacando-se o *cross-docking*. Nesta última secção, expõe-se, ainda, um outro problema associado ao transporte colaborativo – o *Profit Sharing Problem*.

2.1 Cadeia de Abastecimento

Uma cadeia de abastecimento (CA) abrange o conjunto de todos os processos e entidades envolvidas, direta ou indiretamente, na disponibilização dum produto solicitado pelo cliente. Além do fabricante e dos seus fornecedores, inclui distribuidores, retalhistas e até os próprios clientes (Chopra et al., 2013).

O principal objetivo de toda a CA é a satisfação do consumidor. A chave para o alinhamento estratégico está na garantia de que a cadeia de abastecimento consegue responder às necessidades dos clientes e à volatilidade da procura. Para se responder de forma eficaz a este objetivo, cada elo da cadeia terá de se focar na CA como um todo, e não apenas em si, procurando assim, maximizar o valor final gerado. A gestão eficiente e apropriada da cadeia de abastecimento deve considerar todos os procedimentos que agregam valor aos processos, contribuindo para a redução de custos e para o aumento da velocidade de resposta, desde a obtenção de matéria prima até à compra do produto pelo consumidor (Mentzer et al., 2001).

O Conselho de Profissionais de Gestão de Cadeias de Abastecimento (CSCMP - *Council of Supply Chain Management Professionals*) define a Gestão da Cadeia de Abastecimento como “o planeamento e a gestão de todas as atividades de *sourcing* e *procurement*, conversão e todas as atividades de gestão logística”, incluindo “a coordenação e colaboração entre parceiros da cadeia, sejam eles fornecedores, intermediários, prestadores de serviços externos ou clientes”. Em suma, a Gestão da Cadeia de Abastecimento (*Supply Chain Management - SCM*) integra a gestão da oferta e da procura intra e inter empresas e liga as principais funções e processos de negócio em causa, para a viabilização de uma rede coesa e eficiente (CSCMP, 2013).

A gestão bem sucedida da CA requer um planeamento integrado que optimize e coordene todas as atividades de curto, médio e longo prazo. Com base nestes três níveis de decisão, são considerados, por norma, os tipos de planeamento descritos a seguir.

i) Planeamento Estratégico (*Supply Chain Design*): diz respeito às decisões que têm um impacto amplo e de longo prazo na organização (geralmente, um horizonte temporal de vários anos). Externamente, tem como objetivo principal a satisfação do mercado e a construção da vantagem competitiva. Os exemplos incluem a escolha dos locais das instalações (de produção ou distribuição), tendo em consideração potenciais fornecedores, capacidades e fluxos de materiais e produtos ao longo da cadeia logística. (Allaoui et al., 2019)

ii) Planeamento Tático (*Supply Chain Planning*): aborda as decisões de médio prazo (de um trimestre a um ano), como o planeamento de produção, compras, frequência de visitas de clientes e regras de transporte. Visa maximizar o excedente da CA (*supply chain surplus*) que pode ser gerado no horizonte de planeamento, dadas as restrições estabelecidas durante a fase estratégica ou de projeto (Allaoui et al., 2019; Chopra et al., 2013).

iii) Planeamento Operacional (*Supply Chain Operation*): trata decisões de curto prazo (horizonte temporal semanal ou diário). No entanto, deve existir um alinhamento entre as decisões operacionais e aquelas que a organização estrategicamente almeja a longo prazo (Allaoui et al., 2019). Foca-se, sobretudo, na programação de sequências e na alocação de recursos para tarefas. Alguns exemplos prendem-se com o sequenciamento de tarefas de produção, a alocação de camiões nas docas dum armazém e a definição de rotas de veículos.

No sistema estudado, os meios encontram-se perfeitamente definidos. Deste modo, neste trabalho não se abordam decisões de carácter estratégico como, por exemplo, de localização de instalações ou de constituição da frota, focando-se apenas num planeamento de carácter operacional, pressupondo que a montante as decisões estratégicas estão tomadas.

Na secção seguinte é feito o enquadramento do transporte na cadeia de abastecimento, frisando-se a importância do planeamento eficiente de um sistema de distribuição.

2.2 O Transporte e o Desafio da Distribuição

O transporte de mercadorias desempenha um papel capital na cadeia de abastecimento, afetando diretamente a eficiência e a capacidade de resposta desta. Responsável por interligar os diversos pontos duma CA, desde o fornecimento das matérias-primas até à distribuição do produto final pelos consumidores, a rede de transporte acaba por representar uma porção significativa dos custos totais logísticos. Segundo Tseng et al. (2005), cerca de um a dois terços das despesas de logística das empresas são custos de transporte.

Costa et al. (2010) afirmam que “um sistema de transporte eficiente permite que os produtos sejam enviados de forma célere para os locais onde estão a ser procurados, aumentando a sua disponibilidade para os clientes, e permitindo diminuir as vendas perdidas e/ou níveis de existências necessários para assegurar o mesmo nível de serviço”. Acrescenta-se que o planeamento correto e adequado do sistema de distribuição permite ainda economias de escala e uma maior flexibilidade na localização das unidades de produção, assim como a diminuição do preço do produto final, resultante da maior competitividade e da redução de custos associados aos transportes (Chopra et al., 2013).

Do ponto de vista ambiental, o transporte representa, igualmente, um fator significativo nas cadeias de abastecimento. Sabe-se que as emissões de gases de efeito de estufa (GEE) são a principal causa do aquecimento global registado nas últimas décadas, sendo o CO₂ o principal gás responsável pelo fenómeno. Segundo dados da Comissão Europeia (Commission of the European Communities, 2009), o transporte tem sido o setor com a maior taxa de crescimento das emissões de GEE. As emissões de CO₂ relativas ao transporte de mercadorias representam cerca de 14% das emissões totais, tanto a nível europeu, como mundial (Dekker et al., 2012). Além disso, 60% do consumo global de petróleo e 25% do consumo de energia devem-se ao transporte (Rodrigue et al., 2016). No caso da indústria alimentar, o transporte de produtos que obriguem à utilização de certas condições de refrigeração acabam por consumir mais combustível para se conseguir a temperatura necessária. Adekomaya et al. (2016) referem que cerca de 40% dos alimentos transportados precisam de refrigeração, condição responsável pelo consumo de aproximadamente 53% da potência total da operação de transporte. As crescentes preocupações sobre estes impactos negativos do transporte sobre o meio ambiente requerem um replaneamento da rede de distribuição, considerando explicitamente as emissões de GEE (Bektaş & Laporte, 2011).

Dos vários modos de transporte, salienta-se o transporte rodoviário como o meio de transporte de mercadorias que mais se tem expandido nos últimos anos, sendo o mais utilizado em Portugal, e na União Europeia em geral (INE, 2019; Eurostat, 2019). O transporte rodoviário, além de mais flexível, apresenta custos fixos reduzidos quando confrontado com o serviço ferroviário, aéreo ou marítimo - os veículos têm uma pequena representação económica e as operações nos terminais não implicam equipamentos onerosos. Em contrapartida, os custos variáveis são relativamente elevados, devido aos custos referentes aos combustíveis, às portagens e à mão de obra (Costa et al., 2010). Salienta-se, ainda, que o transporte rodoviário consiste no único modo de transporte que possibilita um serviço ponto a ponto, detendo uma grande flexibilidade operacional e permitindo, assim, acesso a pontos isolados. Como tal, é possível constatar que este modo de transporte detém uma enorme competitividade nos casos de distribuição de cargas dispersas, e onde se verifica a necessidade de movimentos rápidos da frota em pequenos lotes (Costa et al., 2010). É, portanto, um meio de transporte direcionado para pequenas e médias distâncias, com maior disponibilidade e rapidez de serviço, e que permite uma maior flexibilidade na definição de rotas.

Reconhece-se, assim, a responsabilidade e importância que o transporte de mercadorias tem ao longo de uma cadeia de abastecimento, bem como a necessidade de sincronização da logística de produção com a logística de distribuição. Um bom planeamento da rede de transporte é essencial para melhorar o fluxo de produtos, para controlar os custos associados à distribuição, e, conseqüentemente, melhorar a eficiência da CA. Na secção seguinte aborda-se um dos principais problemas inerentes ao planeamento dum sistema de transporte – o problema de definição de rotas.

2.3 Vehicle Routing Problem

O problema de definição de rotas de veículos (em inglês *Vehicle Routing Problem* - VRP) é um dos problemas de otimização mais estudados, cuja solução procura o melhor conjunto de rotas que permita que uma frota de veículos atenda todos os pontos de procura, sem que nenhuma restrição específica do problema seja infringida (Golden et al., 2008). A resolução deste problema procura minimizar os custos operacionais que envolvem, normalmente, o número de veículos utilizados e a distância ou tempo totais de viagem (Labadie et al., 2016). A forma clássica do VRP encontra-se representada na Figura 1.

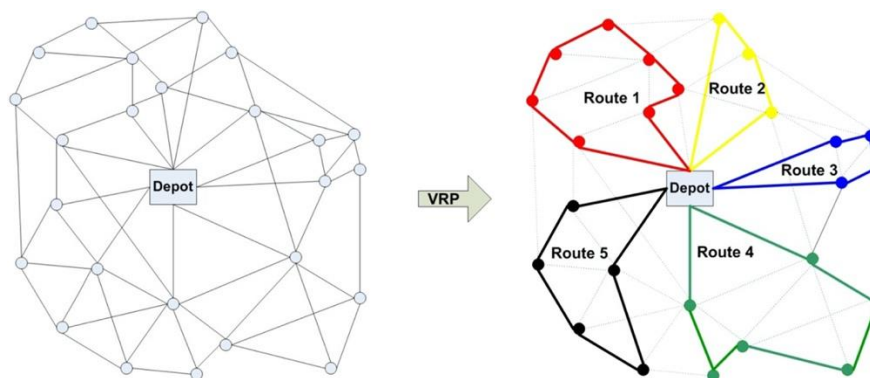


Figura 1 - Representação do VRP clássico (Fonte: Alizadeh Foroutan et al., 2020).

O VRP não é um problema recente, tendo sido introduzido na literatura por Dantzig e Ramser (1959), com uma abordagem algorítmica para a resolução dum caso real de distribuição de gasolina por estações de serviço. Posteriormente, Clarke e Wright (1964) implementaram uma heurística aplicável a situações em que o número de veículos não é fixo, que veio melhorar a solução de Dantzig e Ramser. Desde então, o interesse pelo VRP evoluiu de um pequeno grupo de matemáticos para uma ampla gama de investigadores e profissionais dos mais variados setores.

A solução do problema mais básico de VRP, também referido na literatura como *Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)*, baseia-se num conjunto de rotas que começam e terminam no entreposto, satisfazendo a restrição de que todos os clientes são visitados apenas uma vez, sem que a capacidade do veículo seja ultrapassada. Nesta forma mais simples, o problema pressupõe uma frota de tamanho fixo e cada entrega representa um cliente com procura conhecida antecipadamente (Toth & Vigo, 2002).

Dada a grande abrangência de problemas deste tipo, vários modelos e algoritmos têm sido desenvolvidos para dar resposta às mais diversas variantes do VRP. A literatura acerca deste tema tem sido vastamente ampliada, evidenciado, por exemplo, pelos livros editados por Golden et al. (2008) e Toth e Vigo (2014).

Devido ao rápido desenvolvimento de novos e mais eficientes métodos de otimização e computação, o interesse por problemas de definição de rotas com várias restrições do mundo real tem aumentado. Esses problemas são frequentemente referidos como *Rich Vehicle Routing Problems (RVRP)*, e debruçam-se sobre funções de otimização realistas, considerando a incerteza e o dinamismo associados a uma variedade de restrições da vida real, relacionadas com tempos, distâncias, utilização de frotas heterogéneas, problemas de stocks e questões ambientais (Caceres-cruz et al., 2014). Por outro lado, no caso de problemas de grande dimensão, a obtenção de soluções ótimas implica tempos computacionais pouco razoáveis e, por esse motivo, a maior parte do trabalho de investigação sobre VRP concentra-se nas heurísticas e meta-heurísticas (Vidal et al., 2013), notando-se ainda pouca aplicabilidade dos algoritmos exatos.

Nas subsecções seguintes enunciam-se algumas variantes de VRP que se consideram de maior relevo para este trabalho, bem como as soluções para cada caso específico que podem ser agrupadas entre si, compondo resoluções para questões mais complexas.

2.3.1 Periodic Vehicle Routing Problem (PVRP)

Este tipo de problema é uma extensão do VRP clássico no qual os clientes são visitados mais que uma vez num dado horizonte temporal (Chao et al., 1995), tendo aplicabilidade em diversas áreas, como é o caso da distribuição de produtos alimentares.

O PVRP é considerado um problema multinível que abrange duas vertentes: o problema de atribuição dos clientes aos diferentes dias do período considerado, e o problema de estabelecimento de rotas (Campbell & Wilson, 2014). Uma boa solução do primeiro poderá conduzir a uma solução com elevados custos de transporte. Por outro lado, uma solução de definição de rotas otimizada poderá gerar calendarizações com consequências negativas nos níveis de serviço das empresas envolvidas. A interação temporal e espacial constitui, assim, um desafio para esta classe de problemas, sendo necessário selecionar o padrão temporal de visita de cada cliente e estabelecer as rotas para cada dia do horizonte temporal de acordo com as regras do VRP e de forma a minimizar os custos de operação do sistema (Toth & Vigo, 2014).

Beltrami e Bodin (1974) foram pioneiros na definição de rotas com carácter periódico, fazendo uma breve abordagem deste problema adaptado à recolha de resíduos. Os autores apresentaram um caso de planeamento semanal com clientes que são visitados diariamente e outros que são visitados apenas três vezes. Abordaram o problema com base em dois métodos diferentes: no primeiro, definiram inicialmente as rotas e posteriormente afetaram-nas aos dias da semana, enquanto no segundo inverteram a ordem. A criação das rotas foi feita com recurso aos procedimentos heurísticos de Clarke e Wright (1964). Posteriormente, Russell e Igo (1979) estenderam a análise de Beltrami e Bodin a problemas de maior dimensão e com outras quaisquer frequências de visita, apresentando três heurísticas para a sua resolução. O primeiro artigo a identificar este tipo de problema como um PVRP é de Christofides e Beasley (1984), que propuseram instâncias que ainda hoje constituem a base em que a maioria dos algoritmos dos problemas de rotas periódicas são testados. Chao et al. (1995) propuseram, ainda, uma metodologia em que a afetação dos clientes ignora quaisquer compromissos geográficos. Já Baldacci et al. (2011) foram os primeiros a propor um algoritmo exato para o PVRP. Mais recentemente, têm sido publicados artigos sobretudo acerca das variantes do problema.

2.3.2 Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem (HFVRP)

O problema de planeamento de rotas para veículos em frotas heterogéneas difere do problema clássico por pressupor veículos com capacidades diferentes entre si, o que implica custos diferentes por veículo. O objetivo do HFVRP é minimizar a soma dos custos fixos dos veículos e dos custos variáveis inerentes à definição de rotas (Toth & Vigo, 2014).

Uma vez que a maioria das empresas e organizações lida com frotas heterogéneas, os modelos desenvolvidos para resolverem este tipo de problema são considerados mais realistas do que os construídos para o VRP clássico (Subramanian et al., 2012). Do ponto de vista operacional, uma frota de veículos heterogénea também aumenta a flexibilidade em termos de planeamento de distribuição (Penna et al., 2013).

Distinguem-se duas variantes principais do VRP com frota heterogénea: o *Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem* (FSMVRP) e o *Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem* (HFFVRP). O primeiro foi introduzido pelo artigo seminal de Golden et al. (1984) e pressupõe um número de veículos ilimitado. Para além da determinação das melhores rotas, procura definir a composição da frota. Já o segundo considera um número limitado de veículos, conforme sugerido por Taillard (1999), e procura otimizar a utilização dos veículos de uma frota já definida.

Mais recentemente, o problema de definição de rotas para frotas heterogêneas tem surgido frequentemente associado a questões ambientais. Kwon et al. (2013) consideraram um problema com frota heterogênea fixa, em que o objetivo é a minimização dos custos variáveis da operação, com foco nos custos associados às emissões de carbono. Koç et al. (2014) combinaram um problema de FSMVRP com um *pollution routing problem* (variante de VRP detalhada na subsecção 2.3.4), onde se analisaram as vantagens da utilização de uma frota heterogênea, em oposição a uma frota homogênea. Para a resolução do problema de rotas, os autores introduziram uma metaheurística evolutiva híbrida e testaram a eficácia do algoritmo com instâncias realistas. Para a análise dos benefícios da utilização de veículos com capacidades distintas, realizaram testes com os vários tipos de veículos, de onde concluíram que a utilização de frotas heterogêneas pode reduzir os custos médios em cerca de 25% em transporte de longas distâncias.

Cattaruzza et al. (2017) salientaram algumas especificidades dos problemas de definição de rotas no âmbito da *city logistics*, onde referem dificuldades relacionadas com a entrada de veículos de maior capacidade nas cidades. Nestes casos, os VRP debruçam-se sobre frotas que combinam veículos que possam viajar em meio urbano com veículos maiores responsáveis pela entrega das cargas em centros de consolidação.

2.3.3 Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB)

O problema de planificação de rotas de veículos com *backhauls* é uma extensão do VRP que procura aproveitar a capacidade dos veículos que realizam viagens de retorno em vazio. Esta abordagem foi introduzida na literatura por Deif e Bodin (1984) e considera dois conjuntos diferentes de clientes: os clientes de *linehaul*, que correspondem aos pontos onde os veículos entregam as mercadorias, e os clientes de *backhaul*, referentes às localizações de onde são recolhidos produtos de volta para o entreposto ou armazém.

Para além das condicionantes do problema clássico de VRP, é necessário ter em conta que, em cada rota, todos os clientes de *linehaul* devem ser atendidos antes de se proceder à recolha de produtos nos clientes de *backhaul* para evitar a reorganização da carga do veículo (Toth & Vigo, 2002). Além disso, não podem ser criadas rotas apenas com clientes de *backhaul*, apesar de poderem existir rotas constituídas somente por clientes de *linehaul*.

Embora a meta deste tipo de problema seja igualmente a minimização de custos, o VRPB pode ainda contribuir substancialmente para reduzir as viagens em vazio e o consumo de combustível, o que, por sua vez, contribui para a diminuição do impacto ambiental do transporte (Pradenas et al., 2013).

2.3.4 Pollution Routing Problem (PRP)

Nas últimas duas décadas, as preocupações ambientais conduziram a uma nova categoria nos problemas de definição de rotas chamada *Green Vehicle Routing Problem* (GVRP), que adiciona à minimização dos custos operacionais o objetivo de redução dos custos ambientais. Lin et al. (2014) dividiram o problema em três categorias principais: o *Green Vehicle Routing Problem* propriamente dito (G-VRP), o VRP na Logística Reversa (VRPRL) e o *Pollution Routing Problem* (PRP).

O PRP foi introduzido na literatura por Bektaş e Laporte (2011) como uma extensão do VRP clássico. Os autores propuseram um *Pollution Routing Problem* com ou sem janelas de tempo e desenvolveram uma função objetivo que integra a minimização do custo das emissões de carbono juntamente com os custos operacionais relativos aos motoristas e ao consumo de combustível. Para estimar o consumo de combustível, os autores aplicaram uma versão simplificada do modelo proposto por Barth et al. (2005) e por Barth e Boriboonsomsin (2009). Este modelo simplificado assume que todos os parâmetros permanecem constantes num determinado arco entre dois pontos do VRP, podendo-se variar a carga e a velocidade apenas entre arcos. Posteriormente, Demir, Bektaş e Laporte (2012) propuseram uma heurística para PRP (*Adaptive Large Neighborhood Search - ANLS*) com o intuito de se aumentar a eficiência computacional para um PRP de média ou grande escala. Faulin et al. (2011) apresentaram um CVRP com critérios ambientais e consideraram impactos ambientais mais complexos. Além da medição dos custos económicos e ambientais que são causados pelas emissões poluentes, também consideraram os custos ambientais que advêm do ruído, do congestionamento e do desgaste das infraestruturas. Adicionalmente, Xiao et al. (2012) propuseram uma formulação do CVRP com uma taxa de consumo de combustível, função dependente da carga do veículo.

2.4 Transporte Colaborativo

O transporte e distribuição dos produtos, além de ser um dos setores mais importantes a considerar na gestão da cadeia de abastecimento, é uma das áreas com maior potencial de colaboração. O transporte colaborativo refere-se a qualquer cooperação entre empresas que tenha como objetivo aumentar a eficiência das operações do sistema de distribuição.

Atualmente, devido aos prazos de entrega cada vez mais curtos, algumas empresas acabam por expedir cargas reduzidas com uma maior frequência, que são transportadas por veículos cuja capacidade não é totalmente utilizada. No setor agroalimentar, nomeadamente no transporte de produtos frescos e rapidamente perecíveis, essa é uma realidade comum, principalmente em pequenos produtores. Nestes casos em que as cargas totais a serem entregues são relativamente pequenas em comparação com a capacidade do veículo utilizado, vários despachantes podem propor cargas comuns entre si, de forma a que todos minimizem os seus custos de transporte, pela partilha de veículos (Danloup et al., 2015). Da mesma forma, transportadores com clientes a longas distâncias, que estejam localizados convenientemente próximos de outra empresa transportadora, podem partilhar o cliente, reduzindo, conseqüentemente, as distâncias totais percorridas por ambas as entidades (Fernández et al., 2016).

Por outro lado, a maioria dos veículos que retorna aos entrepostos ou armazéns viaja parcialmente, ou totalmente, em vazio. Neste contexto, o *backhaul* surge como uma poderosa oportunidade de colaboração, ao permitir que os veículos realizem serviços adicionais nessas viagens de retorno, reduzindo, assim, o tempo total em vazio (Santos et al., 2020).

Uma outra possibilidade de colaboração é a utilização de locais de consolidação de mercadorias entre o local de *pick-up* e o local de entrega, de forma a reduzir a distância total percorrida e o número de veículos necessários. Nesses casos, as mercadorias provenientes de diferentes fornecedores que atendem o mesmo entreposto podem ser consolidadas num ponto de *cross-docking*, sendo transportadas posteriormente por um único veículo até ao local de entrega (Santos et al., 2021).

Nos exemplos referidos, conseguem-se distinguir diferentes tipos de sinergia entre os participantes da colaboração, com base no seu nível hierárquico dentro da cadeia de abastecimento. Assim, a colaboração num sistema de distribuição pode ocorrer pela definição de três estratégias diferentes: através da integração **horizontal**, que ocorre entre entidades do mesmo nível da CA; **vertical**, que acontece com entidades de diferentes níveis, como é o caso da colaboração entre fornecedores e retalhistas; e, por fim, a **lateral**, que combina os benefícios e partilha de capacidades da integração vertical e horizontal (Santos et al., 2021). Resta referir que o presente projeto se foca numa colaboração lateral que envolve diferentes tipos de entidades (um retalhista, um operador logístico e vários fornecedores) que podem executar serviços de transporte semelhantes, conduzindo à colaboração horizontal, bem como serviços complementares, conduzindo à colaboração vertical.

2.4.1 *Cross-docking* Colaborativo

O *cross-docking* é uma estratégia utilizada para reduzir os custos de transporte e o tempo de entrega sem aumentar o stock, que ficou popular com o caso de sucesso da *Wal-Mart* (Kreng & Chen, 2008). Neste sistema de distribuição, os produtos nunca são armazenados durante períodos longos. Em contraste com o que acontece num armazém tradicional, nos pontos de *cross-docking* os produtos recebidos são reorganizados e consolidados, consoante os pedidos dos clientes, para serem expedidos no menor tempo possível. Devido à sua natureza, o *cross-docking* é apropriado para produtos que apresentem uma procura estável e que precisem de ser movimentados rapidamente, como é o caso dos produtos agrícolas (Agustina et al., 2010). No entanto, e apesar dos aparentes benefícios, o *cross-docking* tem sido pouco abordado no âmbito do transporte colaborativo.

le Blanc et al. (2006) referiram dois problemas que introduziram *hubs* de consolidação de produtos. O primeiro, de Aykin (1995), consistia em determinar as melhores localizações do *hub* e os melhores métodos de entrega para os clientes, com o objetivo de minimizar o custo total de transporte. No entanto, as instâncias resolvidas ficaram limitadas a 5 *hubs* e 20 pontos de entrega. Posteriormente, Irnich (2000) apresentou um problema com vários entrepostos num contexto de *pick-up and delivery*, com um *hub* central para consolidação das mercadorias. A maior instância resolvida compreendeu 130 pedidos e 22 entrepostos.

Kreng & Chen (2008) compararam os custos de um sistema de distribuição tradicional e de um sistema de distribuição com recurso a um ponto de *cross-docking*, concluindo que neste segundo cenário há uma grande redução dos custos totais logísticos, e que essa redução aumenta quanto maior a quantidade de produtos entregue no centro de *cross-docking*.

Ahmadizar et al. (2015) apresentaram um modelo de VRP de dois níveis com *cross-docking*, em que o primeiro nível é implementado entre *cross-docks* e fornecedores e o segundo nível entre *cross-docks* e o retalhista. O objetivo dos autores seria a minimização dos custos logísticos com a otimização das decisões de consolidação de cargas, bem como das rotas e horários de entrada e saída de veículos. Para isso desenvolveram um algoritmo genético híbrido e validaram a sua performance com vários exemplos numéricos.

Mais recentemente, Santos et al. (2021) apresentaram um caso de colaboração lateral entre um retalhista, um operador logístico e alguns fornecedores, onde foram aplicadas três estratégias colaborativas, de entre as quais o *cross-docking*. Os autores concluíram que o *cross-docking* colaborativo é vantajoso sobretudo nos casos em que as distâncias dos fornecedores ao retalhista são consideravelmente superiores às distâncias daqueles até ao *cross-dock*. Além disso, com as soluções obtidas para o problema de transporte colaborativo, os autores registaram uma redução de 26% dos custos e consumos de combustível totais.

2.4.2 Profit Sharing Problem

A logística colaborativa só é vantajosa se todas as entidades envolvidas saírem beneficiadas com as sinergias criadas. Neste sentido, é necessária a clarificação de como os benefícios são partilhados entre as empresas participantes na colaboração.

Na literatura são vários os métodos de partilha de benefícios, no entanto, em (Gansterer & Hartl, 2018) são salientados três como sendo os mais utilizados: o valor de Shapley, o *Nucleolus* e os métodos proporcionais.

Shapley Value (SV)

O Valor de Shapley é um dos métodos mais recorrentes na literatura, que atribui a cada participante o respetivo custo marginal médio resultante da sua participação na colaboração (Guajardo & Rönnqvist, 2016). Lloyd Shapley (1953) formulou os quatro axiomas em que se baseia o SV, sendo eles:

- Eficiência: o ganho total deve ser inteiramente repartido entre os participantes;
- Simetria: todos os agentes que trazem exatamente o mesmo benefício para a colaboração devem receber os mesmos pagamentos;
- *Dummy property*: se a presença de um dos agentes não gera valor adicional, o valor que recebe é o valor que alcançaria sem a colaboração,
- Aditividade: os custos totais são a soma dos individuais.

Contudo, este método exige a resolução de todas as coligações (subconjuntos de parceiros da colaboração) e pode não garantir estabilidade (Guajardo & Rönnqvist, 2016).

Nucleolus

O Nucleolus é outro método amplamente utilizado, introduzido por Schmeidler (1969), que define um vetor de excesso relacionado com o grau de aceitação de um custo alocado para cada colaboração, e o objetivo é a maximização do excesso mínimo. O excesso pode ser interpretado como o ganho que as empresas de uma coligação obtêm se se retirarem da colaboração que inclui a totalidade dos parceiros (Defryn et al., 2016).

Este método supera vários outros propostos na literatura, em particular no que diz respeito à estabilidade, mas é relativamente difícil de resolver computacionalmente, requerendo, por norma, um algoritmo para resolver um conjunto sequencial de programas lineares (P. Liu et al., 2010).

Métodos Proporcionais

Os métodos proporcionais são os métodos de alocação mais simples da literatura, pois não requerem a resolução de um problema de otimização. Este método providencia uma alocação de custos rápida que considera alguns fatores importantes como as distâncias, a taxa de consumo, a procura ou os custos individuais sem colaboração, mas ignora outros fatores, como as sinergias entre as diversas entidades (Guajardo & Rönnqvist, 2016; Özener et al., 2013).

A principal vantagem da utilização destes métodos é, efetivamente, a sua simplicidade em termos de cálculo e compreensão. No entanto, conforme observado por Liu et al. (2010), por vezes pode ser atribuído a alguns participantes um custo superior ao custo que teriam sem a colaboração. Se os parceiros diferirem significativamente entre si, a alocação poderá ser injusta, pois participantes ineficientes poderão ser favorecidos às custas dos mais eficientes.

Outras evidências da fragilidade destes métodos são apresentadas na literatura. Özener e Ergun (2008) mostraram que, para alocações proporcionais de custos numa rede colaborativa de transportes, o desvio da estabilidade é de aproximadamente 25% em todas as instâncias testadas, o que sugere que existe um risco significativo de desintegração da colaboração. Özener et al. (2013), aplicaram vários mecanismos de alocação de custos a um caso de *vendor-managed inventory*, onde concluíram que o método proporcional utilizado possui um número elevado de subconjuntos instáveis, com valores médios de instabilidade em torno dos 35%.

Apesar destas limitações e críticas por parte de alguns pesquisadores, os métodos proporcionais podem ser mais facilmente escalonáveis para instâncias da vida real (Özener, 2014) e, portanto, a sua implementação é relativamente comum.

Atualmente, não há uma opinião geral ou uma preferência de um método em detrimento de outro na comunidade de investigadores, uma vez que as propriedades definidas na literatura dificilmente são todas cumpridas por um único método de alocação. Por este motivo, existe uma vasta literatura sobre métodos personalizados adaptados a casos reais ou a aplicações mais específicas. Em Lunday & Robbins (2019) é analisado um caso de estudo em que se tenta estabelecer uma colaboração entre empresas produtoras de vacinas. Os autores identificam quatro métodos proporcionais de alocação de custos, na tentativa de estabelecerem uma colaboração estável. Neste trabalho serão testados três desses métodos.

3 Definição do Problema

O presente projeto centra-se num caso de estudo de uma cadeia de abastecimento alimentar e pretende analisar o potencial de colaboração entre algumas das entidades envolvidas, focando-se na distribuição dos produtos alimentares perecíveis. As rotas associadas a este tipo de produtos são essencialmente fixas, pois são artigos que, pelo facto do seu período de vida ser curto, têm de ser repostos frequentemente e a sua procura acaba por apresentar pouca variabilidade.

Neste capítulo é apresentado o problema, definindo-se inicialmente a situação atual da rede de transporte da CA estudada e, posteriormente, a estratégia colaborativa a ser testada. É feita uma descrição de ambos os cenários, sem e com colaboração, explicitando-se as possíveis interações entre os diversos intervenientes, neste caso o retalhista, um operador logístico e um conjunto de fornecedores.

Apesar do problema tratado ter sido motivado por um caso de estudo no retalho alimentar, pretende-se que a sua abordagem seja o mais genérica possível, não se negligenciando a aplicabilidade da metodologia apresentada a qualquer outro setor.

3.1 Caracterização do Cenário Atual

Numa cadeia de abastecimento dita tradicional, cada participante é responsável pelas suas operações de transporte, atuando de forma independente no seu planeamento. No caso estudado, cada fornecedor entrega individualmente as mercadorias nos entrepostos do retalhista, enquanto este define as rotas da sua rede de distribuição de forma a satisfazer os pedidos realizados pelas lojas num sistema *pull* (a procura “puxa” o inventário). Tanto o serviço de transporte utilizado pelo retalhista como pelos fornecedores é maioritariamente subcontratado a operadores logísticos, no entanto, estas entidades surgem como prestadores de serviços externos, atuando estes também individualmente, sem qualquer tipo de colaboração com as outras partes. Uma representação deste cenário é apresentada na Figura 2.

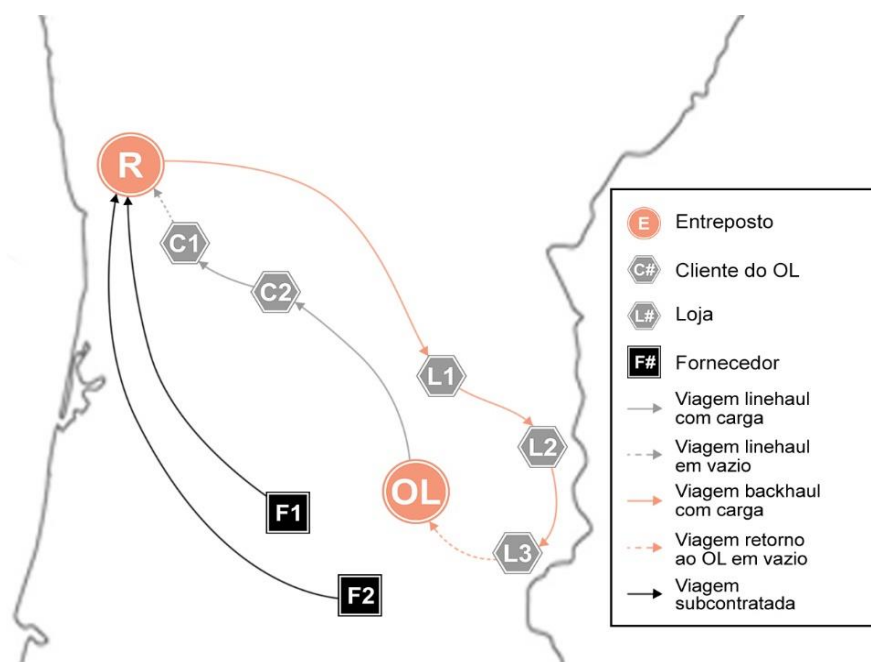


Figura 2 - VRP associado ao cenário sem colaboração.

Neste panorama, os fornecedores que se encontram geograficamente mais afastados dos entrepostos do retalhista acabam por ter custos de transporte mais elevados, o que também se reflete numa inflação do preço dos seus produtos. Por outro lado, devido à crescente periodicidade de entregas semanais, alguns dos fornecedores nem sempre conseguem enviar veículos com a capacidade totalmente preenchida.

Salienta-se, ainda, a problemática das viagens em vazio. Depois de abastecidas todas as lojas, os veículos utilizados pelo retalhista retornam vazios aos respetivos entrepostos, evidenciando-se aqui um potencial de transporte subaproveitado. Conclui-se, portanto, que no cenário atual existem diversas oportunidades de melhoria da eficiência da rede de distribuição associada a esta cadeia de abastecimento, que poderão ser facilmente introduzidas com a implementação de estratégias colaborativas.

Assim, pretende-se analisar de que forma um planeamento de transporte colaborativo poderá ser aplicado a este caso, não se prejudicando os interesses de nenhuma das partes envolvidas. A estratégia de colaboração escolhida para o presente estudo é caracterizada na secção seguinte.

3.2 Descrição da Estratégia Colaborativa

O cenário colaborativo desenhado visa diminuir os custos associados ao transporte das mercadorias na cadeia de abastecimento em estudo, nomeadamente os custos de transporte suportados pelos fornecedores que se encontram mais distanciados dos entrepostos do retalhista.

No caso em estudo, o retalhista possui os seus centros de distribuição estrategicamente localizados em zonas com uma maior densidade de lojas. Já o entreposto do operador logístico encontra-se numa área mais central, favorável ao atendimento de clientes nacionais e internacionais, e que coincide com uma zona em que as lojas do retalhista se encontram mais dispersas. Uma vez que ambas as entidades expedem mercadorias para regiões comuns do país, emerge aqui uma possibilidade de colaboração através da implementação de uma estratégia que renabilize o transporte utilizado para a realização das entregas de ambas as empresas, e que be-

nefície, simultaneamente, os fornecedores que se encontram mais próximos do entreposto do operador logístico. Ao utilizar-se o centro de distribuição desta última entidade como um ponto de *cross-docking*, os fornecedores poderiam reduzir consideravelmente as distâncias viajadas, e, conseqüentemente, reduzir os custos logísticos totais.

Assim, o cenário com colaboração analisado neste projeto ilustra um caso de *cross-docking* colaborativo, em que os fornecedores, em vez de entregarem as suas mercadorias no entreposto do retalhista, realizam as entregas no armazém de um operador logístico geograficamente mais próximo. As cargas são consolidadas com mercadorias de outros clientes do operador logístico e transportadas até ao entreposto do retalhista. Aqui, os veículos são novamente carregados com os produtos a serem distribuídos por um conjunto de lojas do retalhista, ficando o operador logístico responsável pelo abastecimento destas na sua viagem de retorno ao seu entreposto. Acrescenta-se que o retalhista só é visitado depois de realizadas todas as entregas dos clientes do operador logístico, como ilustrado no problema colaborativo presente na Figura 3.

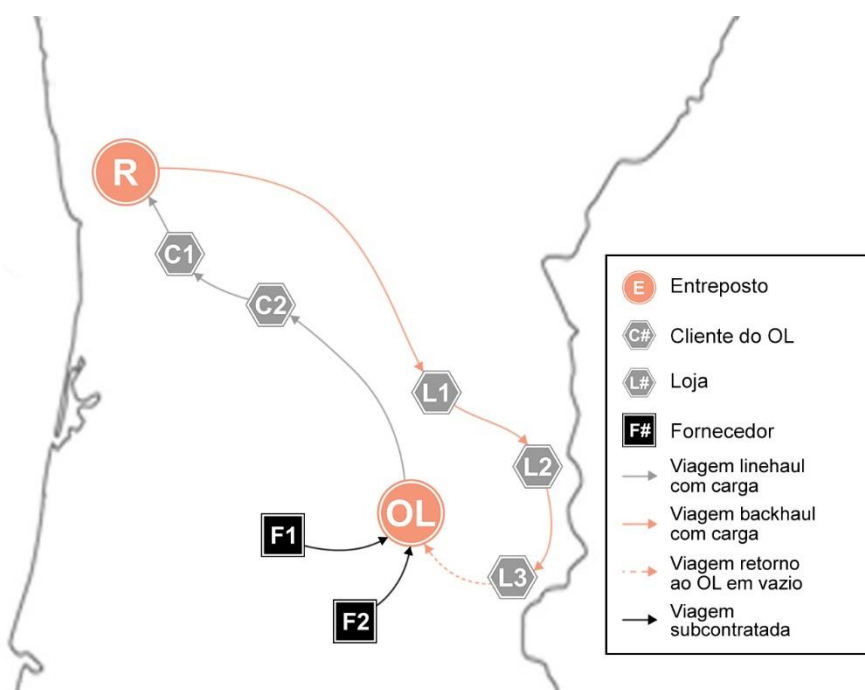


Figura 3 - VRP associado ao cenário com *cross-docking* colaborativo.

Nesta perspetiva, este cenário surge como um *Vehicle Routing Problem with Backhauls* na ótica do operador logístico, uma vez que reúne clientes que exigem entregas (*linehaul customers*) e clientes que requerem recolhas nas viagens de retorno (*backhaul customers*). No entanto, neste caso particular, o retalhista tanto se assume como um cliente de *linehaul* como de *backhaul*, e o operador logístico entrega toda a carga recolhida antes de regressar ao seu entreposto.

3.3 Recolha de Dados

Para a definição deste problema foi necessária a recolha de alguns dados, como localizações, procura das lojas e frequências de entregas. Para a obtenção dessas informações, além da pesquisa concretizada, foram realizados questionários às várias empresas envolvidas, salientando-se de seguida as informações adquiridas mais relevantes à formulação do problema.

Numa primeira fase, fez-se um levantamento dos fornecedores e das lojas situados na região considerada e registaram-se as respetivas coordenadas geográficas, assim como as localizações dos entrepostos do retalhista e do operador logístico. Foram consideradas um total de 11 lojas e de 6 fornecedores, estando estes localizados num raio de 85 km desde o operador logístico. As distâncias dos fornecedores aos entrepostos do retalhista e do operador logístico encontram-se reunidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Distâncias euclidianas entre os fornecedores e os entrepostos do retalhista e do operador logístico.

Fornecedor	Distância ao Retalhista [km]	Distância ao Operador Logístico [km]
F1	177,5	71,6
F2	172,3	40,8
F3	184,1	84,1
F4	93,2	57,2
F5	85,3	63,2
F6	168,1	61,2

Relativamente aos fornecedores, além da localização, importa conhecer com que frequência estes costumam entregar produtos no entreposto do retalhista e quais as quantidades médias expedidas. A maioria dos fornecedores contactados realiza entregas semanais, sendo que alguns entregam duas vezes por semana. Existem, contudo, casos em que só costumam expedir mercadorias para o retalhista quinzenalmente, ou mesmo mensalmente. Na Tabela 2 descrevem-se as quantidades de paletes que, em média, cada fornecedor entrega no entreposto do retalhista e a periodicidade com que realiza essas entregas.

Tabela 2 - Quantidades médias de paletes entregues pelos fornecedores e periodicidade de entrega.

Fornecedor	Frequência de entrega	Dias de entrega	Média de paletes/dia
F1	Duas vezes/semana	Terças e Quintas	15
F2	Duas vezes/semana	Terças e Quintas	2
F3	Entregas quinzenais	Sem dia fixo	1
F4	Uma vez/mês	Quinta	2
F5	Uma vez/semana	Sem dia fixo	7
F6	Duas vezes/semana (entregas sazonais)	Sem dia fixo	3

Visto que em cada dia da semana a quantidade de produtos recebidos no entreposto varia, e que poderá haver dias em que nenhum fornecedor entrega mercadoria, evidencia-se a necessidade de se definir rotas que variam diariamente, mas que se repetem com uma determinada periodicidade. Assim sendo, o problema abordado no presente projeto contempla uma outra variante do VRP apresentada no capítulo 2 – o *Periodic Vehicle Routing Problem*.

Os produtos perecíveis, como frutas/legumes, peixe, carne, laticínios e congelados, apresentam entregas frequentes e procuras relativamente reduzidas, devido ao seu curto período de vida. Sabe-se que as lojas são abastecidas diariamente e, numa primeira instância, assumem-se valores de procura constantes. Para a obtenção desses valores, analisaram-se as quantidades entregues por dia em cada uma das lojas consideradas, durante um período de quatro meses. Os valores médios de procura obtidos encontram-se registados na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidades de procura diária média de cada loja.

Loja	Procura diária média
L1	28
L2	21
L3	21
L4	22
L5	19
L6	22
L7	18
L8	22
L9	23
L10	21
L11	23

4 Solução Proposta

Depois de se definir o problema e a estratégia colaborativa em estudo, apresenta-se no presente capítulo a metodologia seguida para a resolução dos problemas de definição de rotas e de partilha de benefícios. Começa-se por expor o modelo matemático desenvolvido para a otimização do *Vehicle Routing Problem* na secção 4.1, seguido dos procedimentos utilizados para a obtenção de soluções, na secção 4.2. Por fim, na secção 4.3 descrevem-se os métodos de alocação proporcionais utilizados para a resolução do *Profit Sharing Problem*.

4.1 Descrição do Modelo Matemático

Para a resolução do problema de transporte colaborativo foi desenvolvido um modelo matemático baseado no modelo apresentado por Santos et al. (2021) para solucionar um VRP assente em três estratégias colaborativas diferentes. Adaptou-se o modelo original de forma a considerar-se o cenário de *cross-docking* definido na secção 3.2, com uma frota de veículos heterogénea. Visto que nem todos os fornecedores entregam com a mesma frequência semanal, e que em cada dia há diferentes fluxos de cargas, acrescentou-se ao modelo a vertente periódica, de forma a determinar-se o melhor conjunto de rotas para cada dia, no horizonte temporal considerado.

Considere-se um conjunto de n pontos que engloba todas as localizações que constituem a rede de distribuição considerada, $N = \{\alpha, \beta, \dots, n\}$, onde α e β representam, respetivamente, o entreposto do operador logístico e o entreposto do retalhista. Neste conjunto incluem-se as nl lojas a abastecer, $L = \{\beta+1, \dots, nl\}$, bem como os fornecedores, $F = \{nl+1, \dots, n\}$. É conhecida a procura q_{jd} de cada loja no dia d , com $j \in L$, assim como as quantidades q_{fd} que cada fornecedor $f \in F$ envia para o retalhista em determinado dia d . O conjunto dos nd dias que constituem o horizonte temporal do planeamento é representado por $D = \{0, \dots, nd\}$.

A cada rota é atribuído um veículo $k \in K = \{0, \dots, nk\}$, que possui uma capacidade máxima Q_k , em paletes, variável de veículo para veículo. Cada arco $(i,j) \in N$ implica uma distância $d_{ij} = d_{ji}$ percorrida e um custo c_{ijk} pela utilização do veículo k .

Ressalva-se que na construção do modelo não se consideraram dados relativos a outros clientes do operador logístico, tais como localizações e quantidades a entregar. Assim, o único cliente de *linehaul* presente no modelo é o retalhista, sendo este, também, o único cliente de *backhaul*. Uma vez que, para a análise pretendida, a definição exata das rotas que incluem outros clientes de *linehaul* não afeta consideravelmente os resultados obtidos, assume-se, apenas, que os veículos do operador logístico que partem sem a capacidade completamente preenchida transportam cargas a entregar noutros clientes situados na zona do entreposto do retalhista.

Apresentam-se, a seguir, a notação e as variáveis de decisão utilizadas na formulação matemática do problema, seguidas das funções objetivo e das restrições do modelo desenvolvido

Índices:

- i, j : ponto visitado/a visitar
- f : fornecedor
- k : veículo
- d : dia

Parâmetros:

- q_{jd} : procura da loja j no dia d
- q_{fd} : quantidade enviada pelo fornecedor f no dia d
- $h_{fd} = \begin{cases} 1, & \text{se o fornecedor } f \text{ envia carga no dia } d \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- Q_k : capacidade do veículo k
- d_{ij} : distância euclidiana entre o ponto i e o ponto j
- c_{ijk} : custo de transporte pelo veículo k no arco (i, j)
- cd : custo unitário de *cross-docking* por palete
- co : custo unitário de *outsourcing* para os fornecedores, por unidade de carga e por km
- ρ_o : consumo de combustível por km de um veículo vazio
- ρ^* : consumo de combustível por km de um veículo cheio

Variáveis de Decisão:

- $x_{ikd} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } k \text{ atravessa o arco } (i, j) \text{ no dia } d \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- y_{ijkd} : carga transportada no arco (i, j) pelo veículo k no dia d
- $w_{fkd} = \begin{cases} 1, & \text{se a carga do fornecedor } f \text{ é transportada por } k \text{ no dia } d \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- $z_{fj} = \begin{cases} 1, & \text{se o fornecedor } f \text{ entrega a sua carga no entreposto } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

Funções Objetivo:

O modelo desenvolvido tem como objetivo a redução dos custos operacionais, mas também a redução do impacto ambiental. Assim, desenvolveu-se, inicialmente, uma função objetivo que minimiza a distância total percorrida pelos veículos do operador logístico (C^{OL}) e pela frota subcontratada pelos fornecedores (C^F), bem como os custos de *cross-docking* associados à estratégia colaborativa (equação (1)).

$$FO(E) = \min(C^{OL} + C^F) \quad (1)$$

onde

$$C^{OL} = \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} \sum_{i \in LU\{\alpha, \beta\}} \sum_{j \in LU\{\alpha, \beta\}} x_{ijkd} c_{ijk} + \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} z_{f\alpha} h_{fd} q_{fd} cd \quad (1.1)$$

$$C^F = \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} \sum_{j \in \{\alpha, \beta\}} z_{fj} q_{fd} d_{fj} co \quad (1.2)$$

Posteriormente, desenvolveu-se uma função objetivo que minimiza o consumo de combustível com base no *Fuel Consumption Rate* (FCR) introduzido por Xiao et al. (2012). O FCR é usado para calcular os consumos de cada uma das entidades da rede de distribuição e depende da capacidade do veículo, da carga transportada no arco (i, j) , bem como das taxas de consumo do veículo em vazio (ρ_o) e em plena carga (ρ^*) . Assim, a função objetivo (2) pretende minimizar os consumos de combustível dos veículos utilizados tanto pelo operador logístico (CC^{OL}) , como pelos fornecedores (CC^F) .

$$FO(A) = \min(CC^{OL} + CC^F) \quad (2)$$

onde

$$CC^{OL} = \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} \sum_{i \in LU\{\alpha, \beta\}} \sum_{j \in LU\{\alpha, \beta\}} d_{ij} \left(\rho_o x_{ijkd} + \frac{\rho^* - \rho_o}{Q_k} y_{ijkd} \right) \quad (2.1)$$

$$CC^F = \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} \sum_{j \in \{\alpha, \beta\}} z_{fj} d_{fj} h_{fd} \left(\rho_o + \frac{\rho^* - \rho_o}{Q} q_{fd} \right) \quad (2.2)$$

Finalmente, definiu-se uma função multi-objetivo que minimiza simultaneamente os custos associados às distâncias percorridas e aos consumos de combustível, combinando a eficiência económica e ambiental pretendida na resolução do problema (equação (3)).

$$FO(EA) = FO(E) + e \times \eta \times FO(A) \quad (3)$$

onde o parâmetro e representa o custo unitário das emissões de CO_2 e o parâmetro η é utilizado para conversão do consumo de combustível em quantidade de emissões de CO_2 .

Restrições:

$$x_{\alpha\beta kd} \geq x_{j\beta kd}, \quad \forall j, p \in N, \quad \forall k \in K, \quad \forall d \in D \quad (4)$$

$$y_{\alpha\beta kd} = \sum_{f \in F} q_{fd} w_{fkd}, \quad \forall k \in K, \quad \forall d \in D \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} w_{fkd} = z_{f\alpha}, \quad \forall f \in F, \quad \forall d \in D \quad (6)$$

$$\sum_{f \in F} q_{fd} w_{fkd} \leq Q_k, \quad \forall k \in K, \quad \forall d \in D \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijkd} = \sum_{p \in N} x_{jpkd}, \quad \forall j \in N, \quad \forall k \in K, \quad \forall d \in D \quad (8)$$

$$z_{f\alpha} + z_{f\beta} = 1, \quad \forall f \in F \quad (9)$$

Todas as rotas têm início no entreposto do operador logístico, conforme imposto pela restrição (4). Os veículos partem para o entreposto do retalhista carregados com toda a mercadoria consolidada que os fornecedores entregaram em *cross-docking* (restrições (5) e (6)), certificando-se com a restrição (7) que a carga transportada em cada veículo não ultrapassa a sua capacidade máxima. A restrição (8) garante a conservação de fluxo ao longo da rota, e a restrição (9) define se o fornecedor entrega no entreposto do operador logístico (cenário com colaboração) ou no entreposto do retalhista (cenário sem colaboração).

$$\sum_{j \in L} y_{\beta jkd} = \sum_{i \in \{\beta\} \cup L} \sum_{j \in L} x_{ijkd} q_{jd}, \quad \forall k \in K, \quad \forall d \in D \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in L} x_{ijkd} q_{jd} \leq Q_k, \quad \forall k \in K, \quad \forall d \in D \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{ijkd} = 1, \quad \forall j \in L, \quad \forall d \in D \quad (12)$$

$$\sum_{i \in \{\beta\} \cup L} y_{ijkd} - x_{ijkd} q_{jd} = \sum_{p \in \{\alpha\} \cup L} y_{jpkd}, \quad \forall j \in L, \quad \forall k \in K, \quad \forall d \in D \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in L} y_{\beta jkd} = \sum_{j \in L} q_{jd}, \quad \forall d \in D \quad (14)$$

$$\sum_{i \in N} x_{iakd} \geq x_{jpkd}, \quad \forall j, p \in N, \quad \forall k \in K, \quad \forall d \in D \quad (15)$$

Visitado o entreposto do retalhista, a restrição (10) assegura que a carga total recolhida neste iguala a procura das lojas a servir, e a restrição (11) certifica que o limite de capacidade do veículo é novamente respeitado na sua viagem de retorno. Cada loja é visitada exatamente uma vez por dia, por um único veículo, condição colocada pela restrição (12). Com (13) impõe-se que a carga transportada diminui a cada loja visitada e em (14) assegura-se que a procura das lojas é satisfeita totalmente. Todas as rotas terminam no entreposto do operador logístico, conforme definido pela restrição (15).

$$x_{\alpha ikd} = 0, \quad \forall i \in L, \quad \forall k \in K, \quad \forall d \in D \quad (16)$$

$$x_{i\beta kd} = 0, \quad \forall i \in \{\beta\} \cup L, \quad \forall k \in K, \quad \forall d \in D \quad (17)$$

$$x_{iikd} = 0, \quad \forall i \in N, \quad \forall k \in K, \quad \forall d \in D \quad (18)$$

$$x_{ijkd} + x_{jikd} \leq 1, \quad \forall i, j \in N, \quad \forall k \in K, \quad \forall d \in D \quad (19)$$

$$y_{ijkd} \leq x_{ijkd}M, \quad \forall i, j \in N, \quad \forall k \in K, \quad \forall d \in D \quad (20)$$

Adicionalmente, a restrição (16) impede que qualquer veículo parta do entreposto do operador logístico diretamente para uma loja, e a restrição (17) garante que nenhum veículo viaje de uma loja para o entreposto do retalhista. Em (18) assegura-se a inexistência do arco (i,i) , e com a restrição (19) reforça-se que cada veículo atravessa determinado arco (i,j) apenas uma vez. Finalmente, a restrição (20) garante a existência de carga apenas em arcos atravessados.

4.2 Implementação do Modelo

O modelo matemático foi implementado em *Python* 3.9.5, e para a sua resolução optou-se pelo software *Gurobi Optimizer*, na versão 9.1, pela sua simplicidade e facilidade de programação. O computador utilizado para a obtenção das soluções possui um processador Intel Core i7-9750H, com 6 núcleos e 12 *threads* a 2.6-4.5 GHz, e 16 GB de memória RAM.

A implementação do modelo foi feita com recurso à leitura de arquivos criados (Tabela 4) onde se definiram todos os parâmetros e se incluíram os dados necessários à resolução do problema, como as localizações dos entrepostos, das lojas e dos fornecedores, a procura de cada loja, as quantidades entregues pelos fornecedores em cada dia do horizonte temporal considerado e as capacidades dos veículos disponíveis. Por sua vez, a solução obtida pelo software de otimização retorna num ficheiro com os valores das variáveis de decisão e da função objetivo considerada.

Tabela 4 - Ficheiros de instâncias gerados.

Ficheiro	Instância
semana-1.txt	Cenário base da semana #1
semana-3.txt	Cenário base da semana #3
semana-24.txt	Cenário base das semanas #2 e #4
semana-1-sem-5.txt	Cenário base da semana #1 sem o fornecedor sazonal
semana-1-1-pal.txt	Cenário em que todos os fornecedores entregam apenas 1 palete
semana-1-25-pal.txt	Cenário em que todos os fornecedores entregam 25 paletes
semana-1-custo-veic-prop.txt	Cenário em que o custo dos veículos menores é obtido de forma proporcional à sua capacidade (0,6 €/km)
semana-1-procura-50	Cenário em que a procura das lojas é de 50% do cenário base
semana-1-procura-75	Cenário em que a procura das lojas é de 75% do cenário base
semana-1-procura-117	Cenário em que a procura das lojas é de 117% do cenário base
semana-1-procura-decrescente.txt	Cenário em que a procura das lojas é decrescente ao longo da semana mantendo a procura semanal

4.3 Partilha de Benefícios

Depois de resolvido o problema de definição de rotas, importa perceber-se de que forma os ganhos obtidos com a colaboração podem ser distribuídos pelos diferentes participantes. A distribuição justa dos benefícios constitui um dos principais desafios do transporte colaborativo, sendo que a escolha do método de alocação de ganhos pode ser o fator que dita o sucesso ou o fracasso da colaboração. No final, esta só faz sentido se todas as entidades alcançarem lucros económicos.

Pela sua simplicidade e aplicabilidade a casos reais, neste projeto optou-se por se utilizar três métodos proporcionais referidos por Lunday e Robbins (2019), sendo eles:

- **Método de Partilha 1 (MP1):** distribui uniformemente os lucros da colaboração por todos os participantes;
- **Método de Partilha 2 (MP2):** dita a distribuição uniforme dos lucros coletivos, seguida do reembolso das potenciais perdas de cada entidade;
- **Método de Partilha 3 (MP3):** segue o raciocínio inverso do MP2, ou seja, inicialmente reembolsa os participantes que obtiveram perdas e, posteriormente, distribui os lucros restantes de forma uniforme.

5 Análise dos Resultados Obtidos

Para se avaliar o potencial de colaboração entre as diferentes empresas envolvidas no caso prático estudado, realizou-se um conjunto de testes computacionais através da implementação do modelo matemático descrito na secção 4.1. Os resultados obtidos são expostos no presente capítulo, analisando-se tanto o impacto da estratégia colaborativa investigada (quer em termos económicos, quer em termos ambientais), como a performance das regras de alocação de ganhos caracterizadas no capítulo anterior. Procurou perceber-se, ainda, de que forma certos parâmetros do problema influenciam as soluções alcançadas e qual o seu efeito na colaboração investigada.

Numa primeira fase, considerou-se uma instância criada a partir dos dados fornecidos pelas empresas participantes. Esta instância base retrata uma semana da rede de distribuição constituída pelo operador logístico, um entreposto do retalhista, 11 lojas e 6 fornecedores. Para simplificação da obtenção de resultados, e por se tratar de produtos cuja procura apresenta pouca variabilidade, considerou-se que as quantidades diárias a entregar nas lojas são constantes e estão compreendidas entre 18 e 28 paletes por dia. Por sua vez, cada fornecedor entrega entre 1 a 15 paletes, tendo-se definido que as entregas acontecem às terças e quintas. A frequência de entregas de cada um dos fornecedores encontra-se detalhada na Tabela 2, da secção 3.3.

A frota do operador logístico é constituída por 22 veículos, sendo que 11 apresentam uma capacidade máxima de 33 paletes, e outros 11 de apenas 25. O custo variável de transporte, além do custo de *outsourcing* comportado pelos fornecedores e do custo de *cross-docking*, foram estabelecidos com base nos valores apurados por Santos et al. (2021). Já os parâmetros necessários ao cálculo do FCR e às emissões de CO₂ foram definidos a partir de Ubeda et al. (2011) e Bektaş e Laporte (2011), respetivamente. As Tabelas 5 e 6 sintetizam todos estes custos, parâmetros e dados relativos aos veículos utilizados.

Tabela 5 - Características dos veículos.

Veículos			
Tipo	Capacidade [paletes]	Quantidade	Custo variável [€/km]
V1	33	11	0,8
V2	25	11	0,8

Tabela 6 - Parâmetros associados a custos e consumos utilizados no modelo.

Parâmetros					
cd	co	ρ_0	ρ^*	η	e
[€/palete]	[€/km/palete]	[L/km]	[L/km]	[kg CO ₂ /L]	[€/tonCO ₂]
1,3	0,09	0,296	0,39	2,32	37,2

Os resultados obtidos nesta primeira análise onde se estuda o impacto económico e ambiental do *cross-docking* colaborativo aplicado ao caso prático abordado são apresentados na secção 5.1. De seguida, na secção 5.2, analisa-se de que forma alguns dos parâmetros considerados na instância base interferem com a performance da colaboração. Por fim, na secção 5.3, comparam-se os três métodos proporcionais aplicados ao problema de partilha de benefícios resultante da presente estratégia colaborativa.

5.1 Análise da Solução Colaborativa

A instância base foi testada para cada uma das três funções objetivo (económica, ambiental e mista), em ambos os cenários considerados:

- i) a situação atual, sem colaboração, em que os fornecedores entregam as mercadorias no entreposto do retalhista e este abastece as suas lojas com recurso ao serviço de transporte subcontratado ao operador logístico;
- ii) o cenário colaborativo, em que o operador logístico, além de abastecer as lojas, pode servir de ponto de *cross-docking* para os fornecedores e entregar os produtos no entreposto do retalhista.

Nesta instância, construída para um horizonte temporal de sete dias, assumiu-se, inicialmente, o recebimento de produtos provenientes de todos os fornecedores. No entanto, sabe-se que nem todos os fornecedores realizam entregas semanais, como foi observado no capítulo 3. Num qualquer mês, existe, no máximo, uma semana que poderá reunir entregas de todos os fornecedores. Por este motivo, optou-se por se simular um mês (quatro semanas), sendo a calendarização considerada para as entregas dos fornecedores a exposta na Tabela 7.

Tabela 7 - Calendarização das entregas dos fornecedores ao longo de um mês e quantidade de paletes recebidas por semana.

Semana	Fornecedores	Quantidade total recebida (paletes)
1	F1, F2, F3, F4, F5 e F6	50
2	F1, F2, F5 e F6	47
3	F1, F2, F3, F5 e F6	48
4	F1, F2, F5 e F6	47

Desta forma, criaram-se mais duas instâncias derivadas da instância base: uma que ilustra as semanas 2 e 4 (visto ambas apresentarem as mesmas características), e outra referente à semana 3. Os custos operacionais e o consumo de combustível resultantes da solução de cada uma das instâncias são apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7. Analisando-se os resultados apurados, verifica-se que não há uma variação significativa entre semanas e que a percentagem de redução de custos e de emissões de CO₂ que advém da estratégia colaborativa é relativamente constante ao longo do mês. De facto, os fornecedores que não realizam entregas semanais acabam por ter pouco impacto na solução global, uma vez que, para além de entregarem produtos menos frequentemente, a quantidade entregue é também reduzida.

Tabela 8 - Resultados obtidos para a semana 1.

Semana 1	FO(E)		FO(A)		FO(EA)	
	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)
Sem Colaboração	20743,41	10566,31	20743,41	10449,05	20743,41	10449,05
Com Colaboração	20388,05	9144,45	20388,05	9069,43	20388,05	9069,43
Diferença	355,36	1421,86	355,36	1379,62	355,36	1379,62
Benefício (%)	1,71%	13,46%	1,71%	13,20%	1,71%	13,20%

Tabela 9 - Resultados obtidos para a semana 2 e 4.

Semana 2/4	FO(E)		FO(A)		FO(EA)	
	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)
Sem Colaboração	20710,06	10455,23	20710,06	10337,96	20710,06	10337,96
Com Colaboração	20366,30	9083,73	20366,30	9008,72	20366,30	9008,72
Diferença	343,76	1371,50	343,76	1329,24	343,76	1329,24
Benefício (%)	1,66%	13,12%	1,66%	12,86%	1,66%	12,86%

Tabela 10 - Resultados obtidos para a semana 3.

Semana 3	FO(E)		FO(A)		FO(EA)	
	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)
Sem Colaboração	20726,63	10510,42	20726,63	10393,16	20726,63	10393,16
Com Colaboração	20375,16	9109,36	20375,16	9034,34	20375,16	9034,34
Diferença	351,47	1401,06	351,47	1358,82	351,47	1358,82
Benefício (%)	1,70%	13,33%	1,70%	13,07%	1,70%	13,07%

Tratando-se de um caso prático da indústria alimentar, a sazonalidade de alguns produtos é uma característica expectável. De acordo com os dados recolhidos, o fornecedor F6 apenas abastece o retalhista em certos meses do ano. Por este motivo, criou-se uma outra instância onde este fornecedor e a sua carga não são contabilizados. Os resultados foram registados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados obtidos para a semana 1, excluindo-se o fornecedor que realiza entregas sazonais.

Semana 1 sem F6	FO(E)		FO(A)		FO(EA)	
	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)
Sem Colaboração	20652,65	10264,01	20652,65	10146,75	20652,65	10146,75
Com Colaboração	20347,17	9031,81	20347,17	8956,79	20347,17	8956,79
Diferença	305,48	1232,20	305,48	1189,96	305,48	1189,96
Benefício (%)	1,48%	12,01%	1,48%	11,73%	1,48%	11,73%

Comparativamente com os resultados obtidos na semana em que se considera que todos os fornecedores entregam mercadorias nos entrepostos do retalhista ou do operador logístico, observa-se, efetivamente, uma redução do benefício, ainda que de apenas 1%, tanto nos custos operacionais, como no consumo de combustível.

Uma vez que as diferenças de resultados obtidos em cada uma das instâncias anteriores diferem pouco entre si, por uma questão de simplificação optou-se por se utilizar apenas a instância relativa à semana 1 (instância base), nas análises apresentadas nas secções seguintes.

Numa análise global, conclui-se que a estratégia colaborativa tem um maior impacto no que concerne à sustentabilidade ambiental, conseguindo reduzir o consumo de combustível em 13%, o que num mês perfaz uma poupança de quase 5570 litros. Seguindo-se a convenção de Bektaş e Laporte (2011) de que 1 L de combustível pode gerar 2,32 kg de CO₂, a solução encontrada consegue reduzir até quase 13 000 kg de CO₂ emitido por mês. Por sua vez, os custos operacionais diminuem de forma menos impactante, o que, ainda assim, se traduz numa redução de cerca 1600 € mensais. Esta diferença menos significativa na eficiência económica do planeamento do transporte colaborativo deve-se, sobretudo, ao facto de não haver uma diminuição do número de veículos utilizados com a implementação da estratégia colaborativa. A realização de *cross-docking* no entreposto do operador logístico diminui as distâncias percorridas pelos fornecedores e, conseqüentemente, os custos por eles comportados. No entanto, as rotas realizadas para o abastecimento das lojas representam a maior fatia dos custos operacionais e acabam por não sofrer alterações no cenário colaborativo. São utilizados, no total, 11 veículos por dia, o que significa que cada veículo visita apenas uma loja. Este valor seria expectável pelo facto do valor da procura de cada loja apresentar pouca margem em relação às capacidades dos veículos utilizados, e por o modelo definir uma única visita a cada loja.

Salienta-se, ainda, o facto de não haver diferenças abruptas entre os resultados obtidos para cada uma das funções objetivo. Quer se procure minimizar o consumo de combustível, quer se opte por minimizar o custo económico do problema, as soluções obtidas são muito semelhantes. Contudo, ambas as funções que consideram a componente ambiental conseguem a maior poupança de litros de combustível consumidos, ao mesmo custo operacional obtido pela função económica. Isto acontece devido ao facto de a FO(A) e a FO(EA) considerarem os consumos de combustível, que estão associados à capacidade dos veículos. Como se estabeleceu que ambos os tipos de veículo apresentam valores de ρ_0 e ρ^* iguais, mas capacidades diferentes, o consumo de um veículo de maior capacidade, mas que transporta a mesma carga, é menor que o de um veículo de capacidade inferior. Por este motivo, tanto a função ambiental, como a função mista acabam por apresentar resultados ligeiramente mais vantajosos em relação à função económica. Os consumos de combustível e as emissões de CO₂ dependem de vários fatores e parâmetros mais dificilmente quantificáveis, o que torna as funções objetivo de índole ambiental mais complexas. Desta forma, a utilização de uma função objetivo que, apesar de visar somente a minimização dos custos operacionais da rede de transporte, proporciona igualmente uma boa solução em termos ambientais, é uma opção mais simples mas perfeitamente viável perante o modelo desenvolvido.

5.2 Análises de Sensibilidade

Neste subcapítulo exploram-se alguns dos parâmetros do problema, analisando-se de que forma a sua variação influencia positiva ou negativamente as soluções obtidas anteriormente. Os parâmetros avaliados são o custo atribuído à realização de *cross-docking* (cd) no operador logístico, o custo de *outsourcing* (co) comportado pelos fornecedores na entrega dos seus produtos, a variabilidade da procura das lojas do retalhista (q_{jd}), a quantidade de produtos entregue por cada fornecedor (q_{fd}) e o custo variável dos veículos (c).

5.2.1 Impacto do Custo de *Cross-docking*

O custo de *cross-docking*, no modelo construído, é o principal encargo que a estratégia colaborativa vem acrescentar ao planeamento de transporte e à solução sem colaboração. Este parâmetro, juntamente com o valor que os fornecedores pagam pela subcontratação de um serviço de distribuição externo, pode ditar a participação de mais ou menos fornecedores na colaboração.

Assim, testou-se a instância base com mais quatro valores de *cd*. Uma vez que a influência dos fornecedores que não realizam entregas semanais é pouco significativa nos resultados obtidos para cada semana, conforme verificado em 5.1, optou-se por se testar apenas a semana 1, em que todos os fornecedores entregam mercadorias, assumindo-se resultados semelhantes para as restantes semanas.

Dos resultados obtidos, concluiu-se que, independentemente da função objetivo utilizada, o aumento do custo de *cross-docking* origina reduções de custos operacionais cada vez menores, como seria previsível (Figura 4). Segundo a solução obtida com a função objetivo ambiental, a estratégia colaborativa deixa de ter um benefício económico a partir de um *cd* de aproximadamente 8,50 € por palete, o que se traduz num aumento de praticamente 650% em relação ao custo de *cross-docking* considerado na instância base (1,30 €/palete). Conclui-se, assim, que a eficiência económica da solução obtida só é consideravelmente prejudicada pelo aumento de *cd* quando este assume um valor significativamente elevado.

Por observação da Figura 5, em relação ao consumo de combustível pode-se concluir que o incremento de *cd* leva a uma poupança de litros consumidos cada vez menor quando utilizadas as funções objetivo económica e mista. Já com a função ambiental, o consumo de combustível mantém-se constante para os valores de *cd* avaliados. O benefício em termos de combustível consumido diminui com o aumento de *cd* porque, à medida que se aumenta este valor, cada vez menos fornecedores são seleccionados para participarem na estratégia colaborativa, como se pode observar na Figura 6. De facto, a função ambiental considera apenas os quilómetros percorridos, sendo independente do custo de *cross-docking*, portanto, quando é utilizada esta função, o número de fornecedores escolhidos não se altera. Isto explica o facto de os litros de combustível consumido se manterem constantes na solução obtida com a FO(A), fazendo-se sentir o aumento de *cd* apenas nos custos operacionais. Por fim, ressalva-se que para as alterações no número de fornecedores seleccionados se fazer notar, o custo de *cross-docking* teria de aumentar mais de 200%.

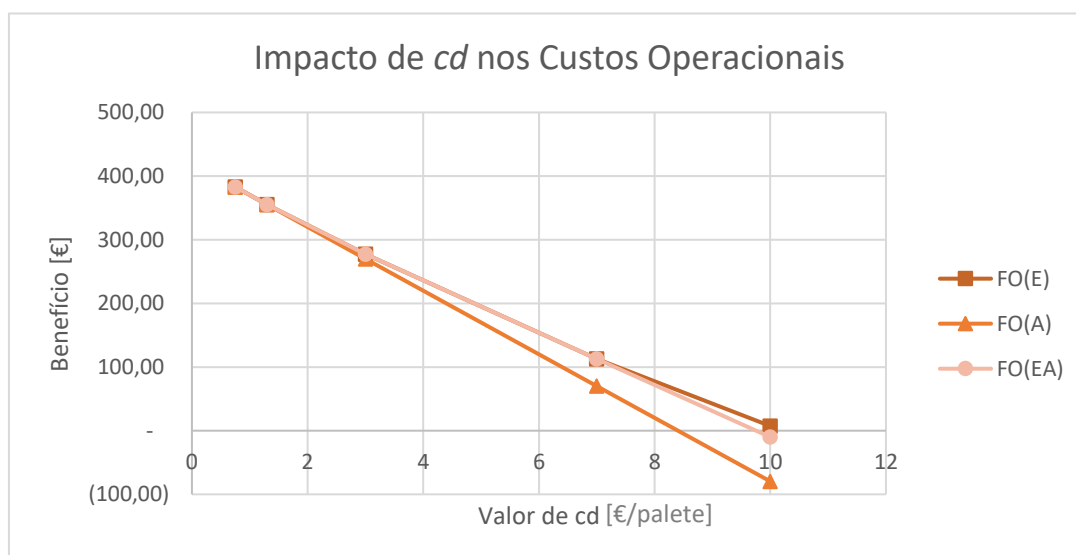


Figura 4 - Gráfico relativo ao impacto de *cd* na redução dos custos operacionais.

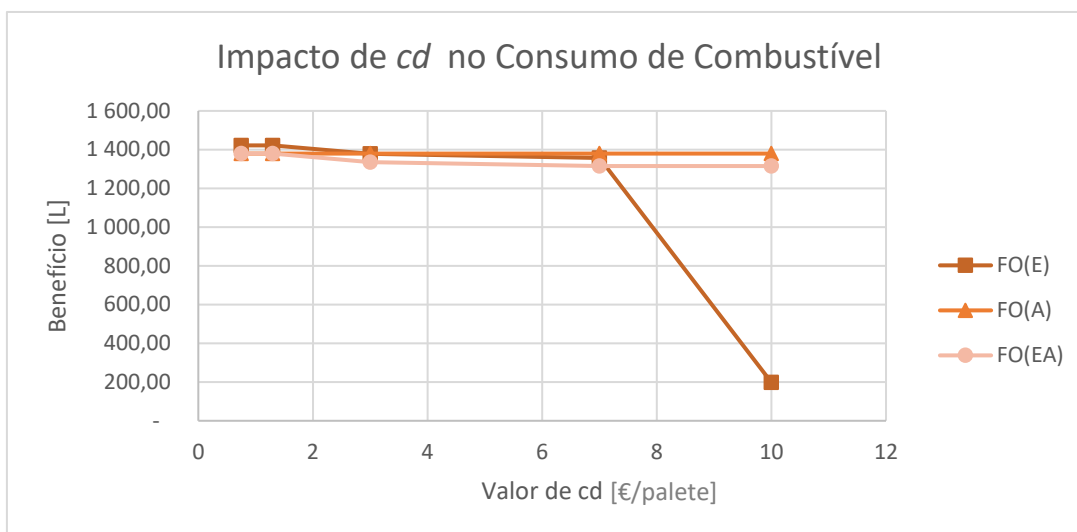


Figura 5 - Gráfico relativo ao impacto de cd na redução do consumo de combustível.

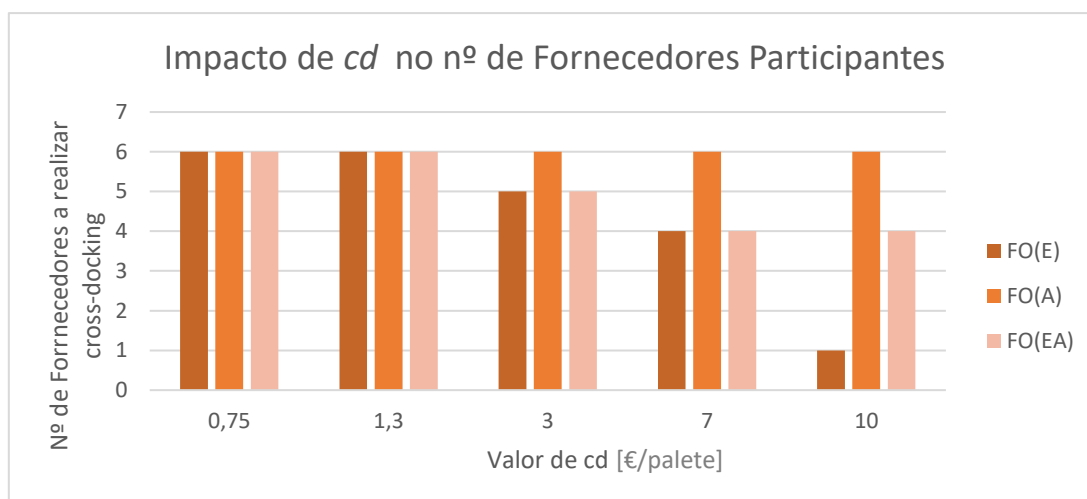


Figura 6 - Gráfico relativo ao impacto de cd no nº de fornecedores participantes na colaboração.

5.2.2 Impacto do Custo de Outsourcing

Para se analisar o impacto do gasto comportado pelos fornecedores associado à subcontratação de um serviço externo para o transporte das suas mercadorias, testou-se a instância base com outros três valores de *co*.

O custo de *outsourcing* inicialmente considerado (0,09 € por palete e por quilómetro viajado), mesmo sendo relativamente baixo comparativamente com outros valores encontrados na pesquisa realizada, acaba por beneficiar igualmente a realização de *cross-docking*, uma vez que todos os fornecedores se encontram muito mais próximos do entreposto do operador logístico do que do entreposto do retalhista. Ou seja, a implementação da estratégia colaborativa compensa todos os fornecedores do problema, uma vez que reduz significativamente a distância percorrida. No entanto, observando-se a Figura 7, percebe-se que a eficiência económica da solução obtida aumenta substancialmente em casos cujos valores de *outsourcing* aplicados são consideravelmente superiores ao considerado no caso de estudo. Para valores de *co* na ordem

dos 0,20 € (aumento de 222%), o modelo desenvolvido consegue uma poupança de quase 900 € em qualquer uma das três funções objetivo.

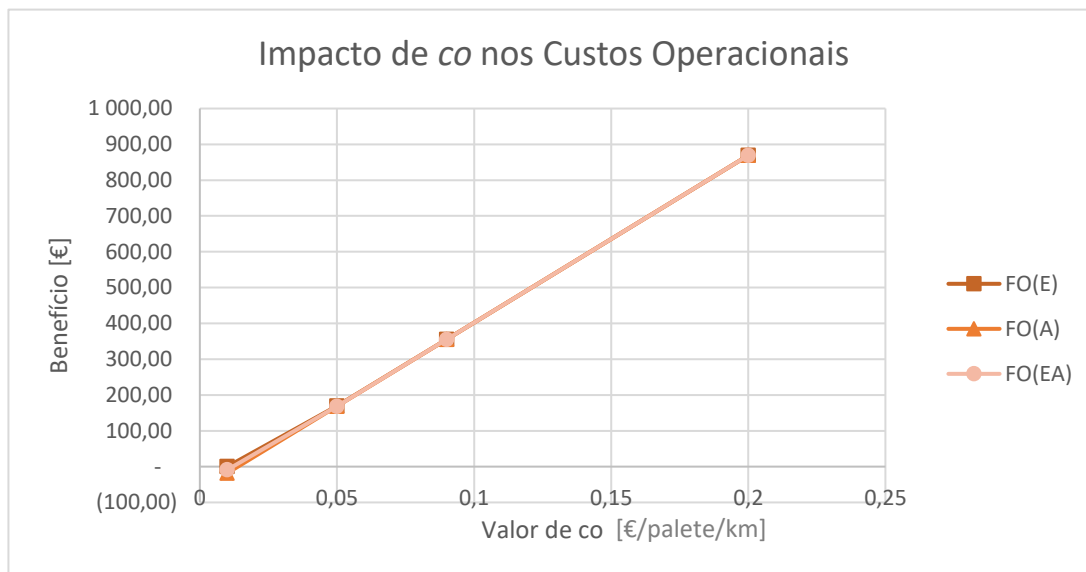


Figura 7 - Gráfico relativo ao impacto de *co* na redução dos custos operacionais.

Em termos de combustível consumido, o impacto do *co* só se faz notar significativamente quando o seu valor é bastante reduzido, o que acaba por se mostrar pouco razoável num caso prático. De facto, o custo de *outsourcing* precisaria de diminuir para um custo pouco realista para que a realização de *cross-docking* deixasse de beneficiar algum dos fornecedores, como demonstrado no gráfico presente na Figura 9. À semelhança do que acontece na análise de sensibilidade do *cd*, a variação de *co* não tem impacto no número de fornecedores selecionados pela função objetivo ambiental e, por isso, apenas os custos operacionais variam com a alteração do custo de *outsourcing* quando utilizada esta função.

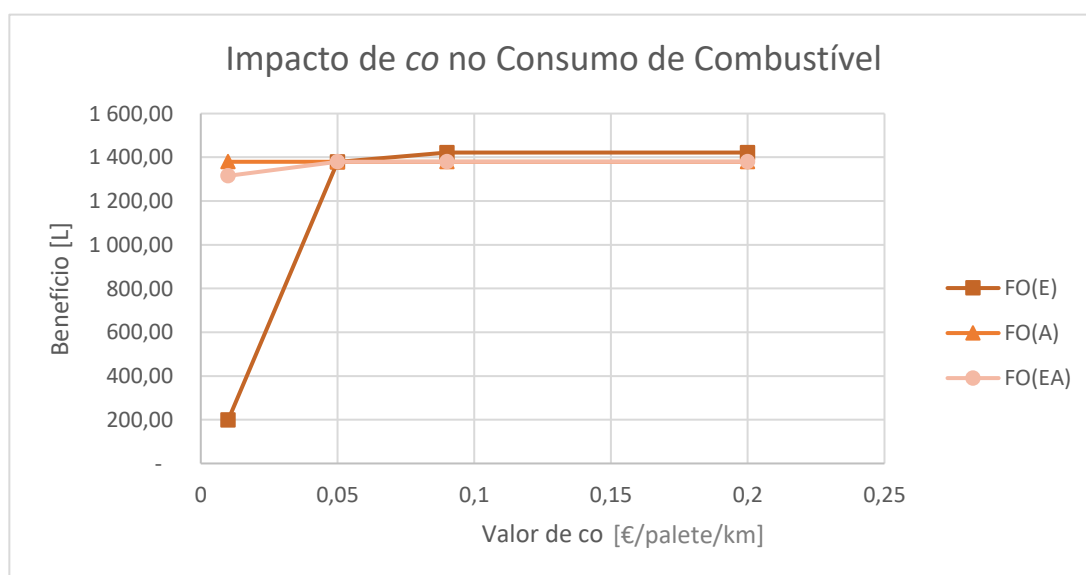


Figura 8 - Gráfico relativo ao impacto de *co* na redução do consumo de combustível.

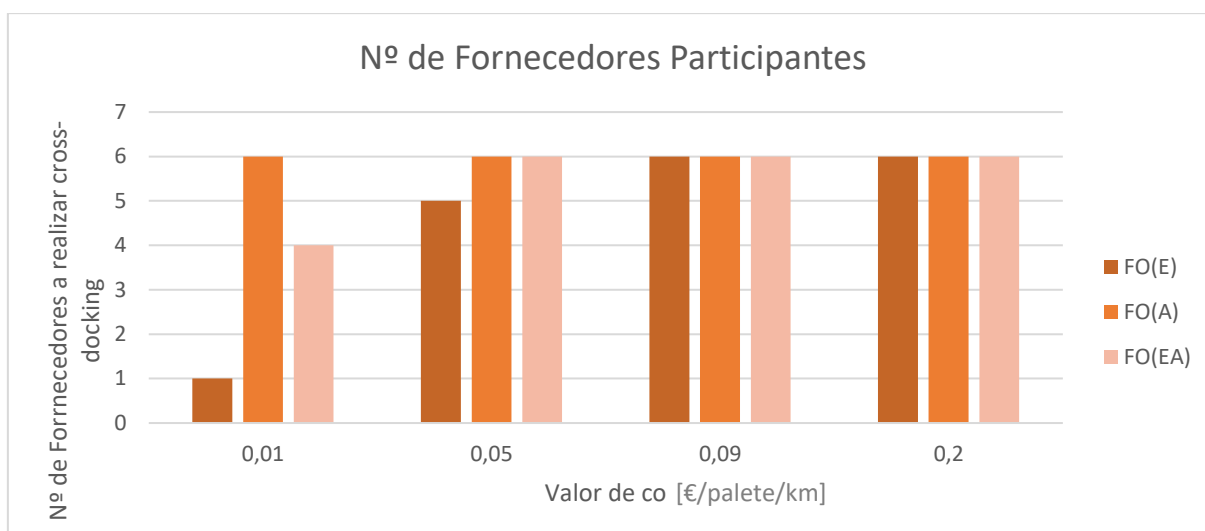


Figura 9 - Gráfico relativo ao impacto de co no nº de fornecedores participantes na colaboração.

5.2.3 Variação da Procura

Na indústria alimentar, é frequente a procura de produtos perecíveis apresentar pouca variabilidade, por serem produtos repostos com maior frequência. Por este motivo é que se considerou uma procura constante de cada loja na abordagem do problema, como explicado anteriormente.

Contudo, considera-se que a procura dos clientes pode ser um dos fatores que maior influência terá num problema de definição de rotas. Assim, considerou-se oportuno analisar a sensibilidade do modelo à variação da procura que o retalhista hipoteticamente enfrenta. Para isso, criaram-se mais quatro instâncias, associadas a quatro cenários que diferem entre si pelas quantidades a serem entregues nas lojas, sendo eles:

- **Caso 1** – procura diária baixa, com 50% da procura habitual;
- **Caso 2** – procura diária baixa, com 75% da procura habitual;
- **Caso 3** – procura diária alta, com 117% da procura habitual;
- **Caso 4** – procura diária decrescente ao longo da semana, mantendo-se a procura semanal fixa.

Os resultados obtidos para os três primeiros casos são apresentados nas tabelas 12, 13 e 14. Ressalva-se que, para o Caso 1, as simulações para o cenário com colaboração atingiram o limite de tempo de execução estabelecido de 3600 segundos, com um gap de 0,21% para a FO(E), 1,50% para a FO(A) e 0,40% para a FO(EA).

Tabela 12 - Resultados obtidos para o Caso 1 - procura diária a 50%.

Caso 1	FO(E)		FO(A)		FO(EA)	
	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)
Sem Colaboração	8264,97	5543,23	8298,07	5537,08	8264,97	5542,34
Com Colaboração	7909,62	4162,73	7942,71	4157,46	7909,62	4162,73
Diferença	355,35	1380,50	355,36	1379,62	355,35	1379,61
Benefício (%)	4,30%	24,90%	4,28%	24,92%	4,30%	24,89%

Tabela 13 - Resultados obtidos para o Caso 2 - procura diária a 75%

Caso 2	FO(E)		FO(A)		FO(EA)	
	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)
Sem Colaboração	11658,52	6946,75	11685,24	6943,41	11685,24	6943,41
Com Colaboração	11329,88	5567,13	11329,99	5563,80	11329,88	5563,80
Diferença	328,64	1379,62	355,25	1379,61	355,36	1379,61
Benefício (%)	2,82%	19,86%	3,04%	19,87%	3,04%	19,87%

Tabela 14 - Resultados obtidos para o Caso 3 - procura diária a 117%

Caso 3	FO(E)		FO(A)		FO(EA)	
	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)
Sem Colaboração	20743,41	10629,82	20743,41	10564,82	20743,41	10564,82
Com Colaboração	20388,05	9226,41	20388,05	9185,21	20388,05	9185,21
Diferença	355,36	1403,41	355,36	1379,61	355,36	1379,61
Benefício (%)	1,71%	13,20%	1,71%	13,06%	1,71%	13,06%

Nos casos de procura baixa (1 e 2), registam-se valores de custos operacionais e de consumo de combustível inferiores aos obtidos na instância base. No entanto, no Caso 3, que retrata um cenário de procura alta, verifica-se que a solução encontrada é semelhante à alcançada com os valores de procura diária média, considerada no presente trabalho como a procura habitual das lojas. Isto deve-se ao facto de, nos casos de procura baixa, o número de veículos utilizados reduzir consideravelmente, como se pode observar no gráfico presente na Figura 10. Como nestes dois cenários cada veículo consegue abastecer totalmente mais que uma loja, os custos operacionais e os litros de combustível consumido reduzem.

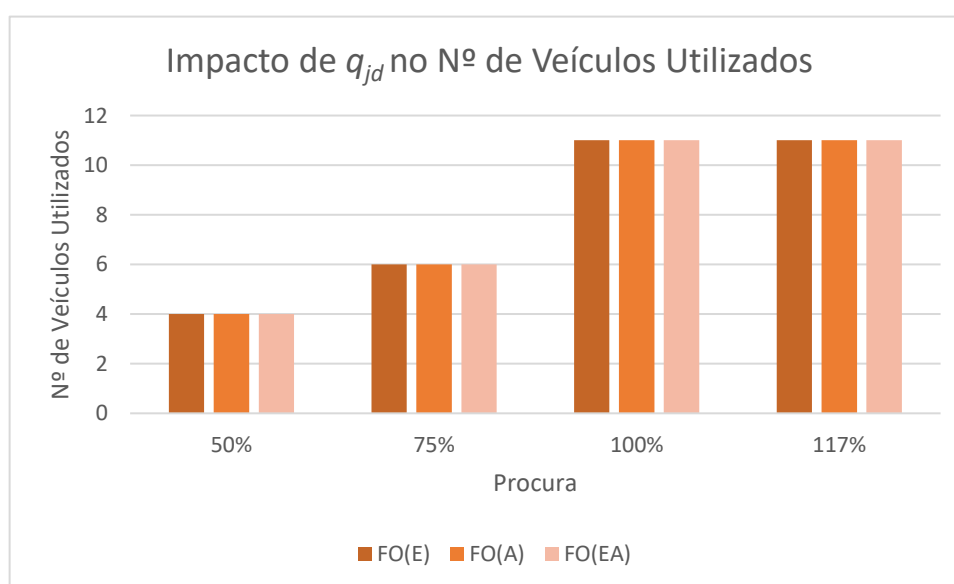


Figura 10 - Gráfico relativo ao impacto da procura das lojas no nº de veículos utilizados.

Já no caso de procura alta, o número de veículos utilizados mantém-se, quando comparado com a solução obtida com a instância base, e, por isso, não se notam diferenças nos custos operacionais. Por outro lado, apesar do número de veículos se manter, há um ligeiro aumento dos consumos de combustível, o que é facilmente explicado pelo aumento de carga transportado em cada arco. Saliencia-se que o valor de 117% considerado para ilustrar um cenário de procura acima da média foi definido com base na loja que normalmente recebe mais produtos. Uma vez que o modelo desenvolvido impõe que cada loja seja visitada por apenas um veículo, e que os veículos disponíveis possuem uma capacidade máxima de 33 paletes, a loja L1 pode receber no máximo mais 17% das paletes que habitualmente recebe. Para se considerar valores de procura mais elevados, o modelo teria de ser alterado de forma a permitir mais que uma visita por loja.

Para se simular a variação decrescente da procura no Caso 4, utilizou-se, de novo, a procura habitual da loja com maior quantidade média de paletes recebidas como teto para qualquer aumento de procura que se aplicasse. Uma vez que a loja L1 recebe normalmente 28 paletes por dia, estipulou-se que, no máximo, essa loja poderia sofrer um aumento de aproximadamente 17% da sua procura semanal. Atribuiu-se, então, aos primeiros quatro dias de cada loja esta percentagem da procura total duma semana habitual, reduzindo-se para 12% no quinto e sexto dias, e terminando-se com 8% da procura semanal no último dia. Com esta distribuição de valores, o Caso 4 ilustra uma semana em que nos primeiros quatro dias existe uma procura maior que a geralmente registada e uma procura abaixo da média a partir do quinto dia. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados obtidos para o Caso 4 - procura decrescente.

Caso 4	FO(E)		FO(A)		FO(EA)	
	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)	Custo (€)	Combustível (L)
Sem Colaboração	18746,50	9778,81	18746,50	9710,42	18746,50	9710,42
Com Colaboração	18391,14	8406,07	18391,14	8330,80	18391,14	8330,80
Diferença	355,36	1372,74	355,36	1379,62	355,36	1379,62
Benefício (%)	1,90%	14,04%	1,90%	14,21%	1,90%	14,21%

Este último caso retratado é o que mais se aproxima do caso real, na medida em que a procura varia de dia para dia. Observando-se a Tabela 15, e por comparação com os resultados obtidos para a instância base apresentados na secção 5.1, constata-se que, apesar da procura semanal ser a mesma nos dois casos, o facto das quantidades entregues variar diariamente permite uma solução otimizada com menores custos operacionais e um consumo total de combustível mais baixo. Isto porque, na instância base, cada veículo consegue atender apenas uma loja, em todos os dias da semana. Já na instância referente ao Caso 4, a partir do quinto dia, o número de veículos utilizados diminui, como se pode observar na Figura 11, o que contribui para uma redução de custos e de consumos.

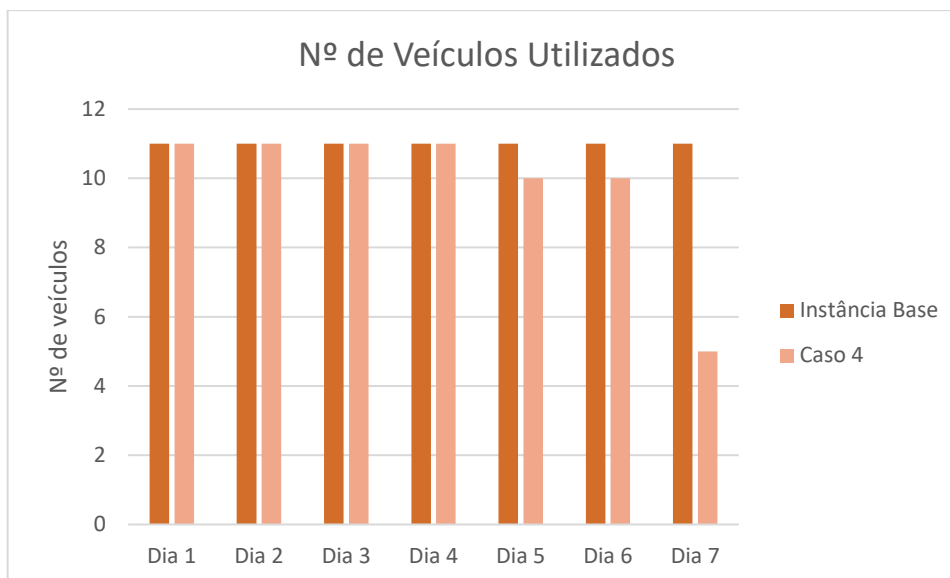


Figura 11 – Comparação entre a instância base e o caso 4 relativamente ao impacto da procura das lojas no nº de veículos utilizados.

5.2.4 Variação da Quantidade de Produtos Entregue pelos Fornecedores

Na secção 5.1 observou-se que os fornecedores que entregam as menores quantidades de produtos nos centros de consolidação de cargas têm pouco impacto nas soluções obtidas. Perante essa conclusão, analisou-se de que forma as sinergias da colaboração são afetadas com a variação das quantidades de paletes a serem entregues nos entrepostos do retalhista ou do operador logístico. Criaram-se, assim, duas novas instâncias, de forma a simular-se um cenário em que todos os fornecedores entregam apenas uma paleta cada e um caso em que todos os fornecedores enviam produtos de forma a preencherem a capacidade total dos seus veículos, entregando, nesta situação, 25 paletes. Ressalva-se que em ambas as instâncias se manteve o número de entregas e a calendarização apresentados anteriormente, variando-se somente a quantidade entregue por cada fornecedor.

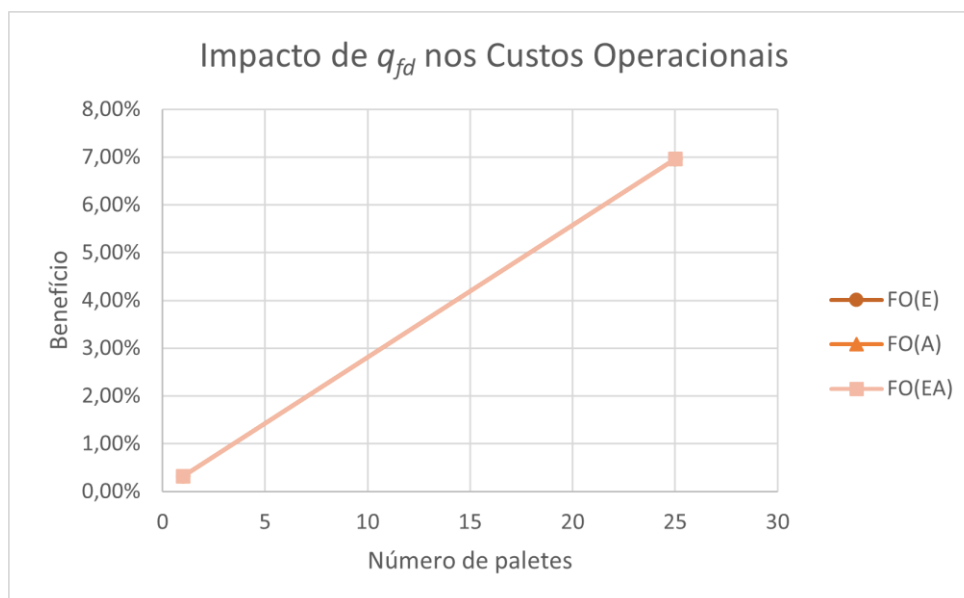


Figura 12 - Gráfico relativo ao impacto da variação das quantidades entregues pelos fornecedores nos custos operacionais.

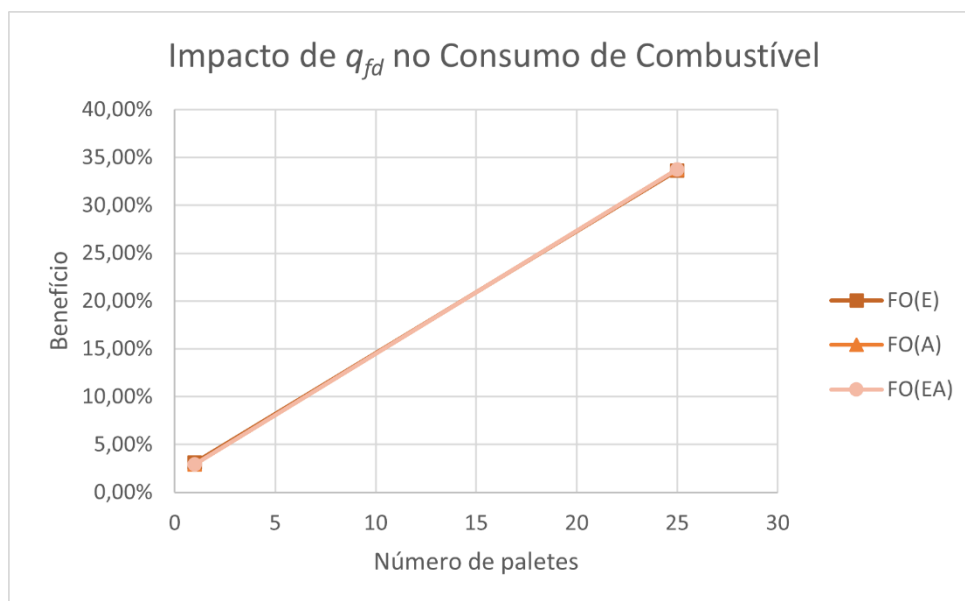


Figura 13 - Gráfico relativo ao impacto da variação das quantidades entregues pelos fornecedores no consumo de combustível.

As Figuras 12 e 13 evidenciam um claro aumento da sinergia da colaboração, tanto em termos económicos como ambientais, com o incremento das quantidades de produtos entregues pelos fornecedores. Ao utilizarem veículos em plena carga, com 25 paletes cada, com a estratégia colaborativa os fornecedores conseguem reduzir os custos operacionais em aproximadamente 7%, além de alcançarem uma poupança no consumo de combustível de cerca de 34%. Comparativamente com os resultados obtidos na simulação da instância base (secção 5.1), o envio de veículos com capacidade completa proporciona um aumento dos benefícios económico e ambientais da colaboração em 5% e 20%, respetivamente. Conclui-se, assim, que a redução dos custos totais logísticos alcançada com a realização de *cross-docking* colaborativo aumenta quanto maior for a quantidade de produtos entregues no ponto de *cross-docking*.

No sentido oposto, a redução da carga enviada pelos fornecedores poderá prejudicar o interesse da colaboração. No entanto, constata-se que, mesmo que todos os fornecedores enviem apenas uma paleta por entrega, a realização de *cross-docking* continua a ser vantajosa em todos os casos analisados. Apesar dos benefícios relativos baixarem para percentagens muito reduzidas, a estratégia colaborativa continua a evidenciar-se profícua na minimização de custos operacionais e de consumos de combustível.

5.2.5 Impacto do Custo Variável de Transporte

A frota considerada no problema, conforme explicitado no início do presente capítulo, é constituída por veículos de diferentes capacidades, distinguindo-se entre veículos de 33 e 25 paletes. Apesar de se tratar de uma frota heterogénea, com base na pesquisa realizada consideraram-se, na formulação do problema, custos variáveis de transporte (c) iguais para ambos os tipos de veículo.

Na simulação da instância base, verificou-se que os veículos utilizados em cada uma das soluções obtidas com a função objetivo económica variam aleatoriamente, nos casos em que as cargas a transportar não perfazem as 25 paletes. Ou seja, quando existe a opção de se seleccionar um veículo maior ou menor, o programa escolhe de forma aleatória entre os dois tipos de veículo, obtendo-se resultados diferentes em cada uma das simulações realizadas para a mesma instância. No gráfico presente na Figura 14 é apresentada a quantidade de veículos de cada tipo registados numa das soluções obtidas. Uma vez que a função objetivo ambiental não considera o custo variável de transporte, esta foi excluída da análise realizada.

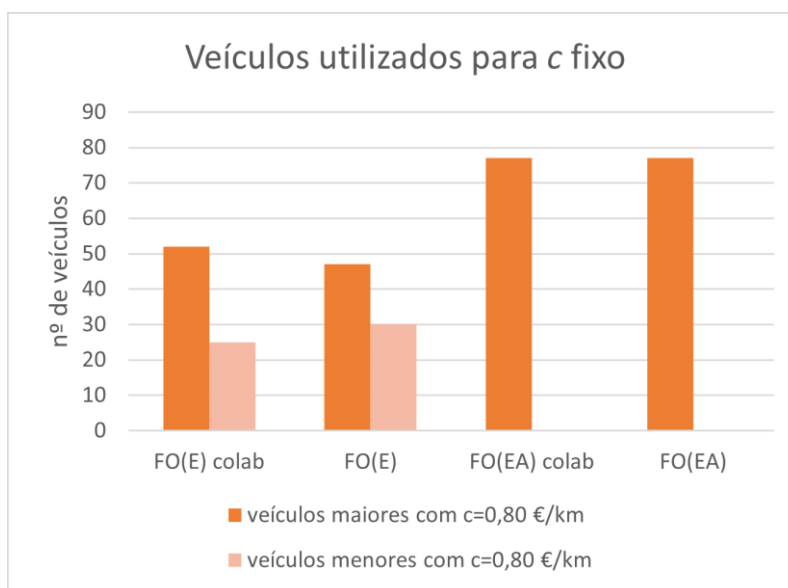


Figura 14 - Gráfico relativo ao nº de veículos de cada tipo utilizados na instância base.

Ao longo da semana da instância base são utilizados no total 77 veículos. A solução obtida com a função objetivo mista, por considerar as capacidades dos veículos, compreende apenas veículos maiores, o que pode ser explicado pelo facto de se terem considerado taxas de consumo em vazio (ρ_o) e em plena carga (ρ^*) iguais para ambos os tipos de veículo. Como havia sido explicado na secção 5.1, ao apresentarem os mesmos consumos, os veículos de maior capacidade conseguem melhores resultados quando aplicada a fórmula introduzida por Xiao et al. (2012) para o cálculo do FCR.

Por sua vez, a função económica origina uma solução constituída por ambos os tipos de veículo, mas alocando às rotas a realizar maioritariamente os veículos de capacidade superior, tanto no cenário colaborativo, como no cenário não colaborativo.

Para se compreender melhor o benefício da utilização de uma frota heterogénea neste tipo de problemas, realizou-se uma análise de sensibilidade ao custo variável de transporte dos veículos, definindo-se uma instância adicional onde se estabelece um custo variável proporcional à capacidade do veículo. Desta forma, manteve-se o custo variável dos veículos maiores em 0,80 € e alterou-se o dos veículos menores para 0,60 €. No gráfico presente na Figura 15 encontram-se registados a quantidade de veículos de cada tipo utilizados em cada uma das soluções obtidas com as funções objetivo económica e mista.

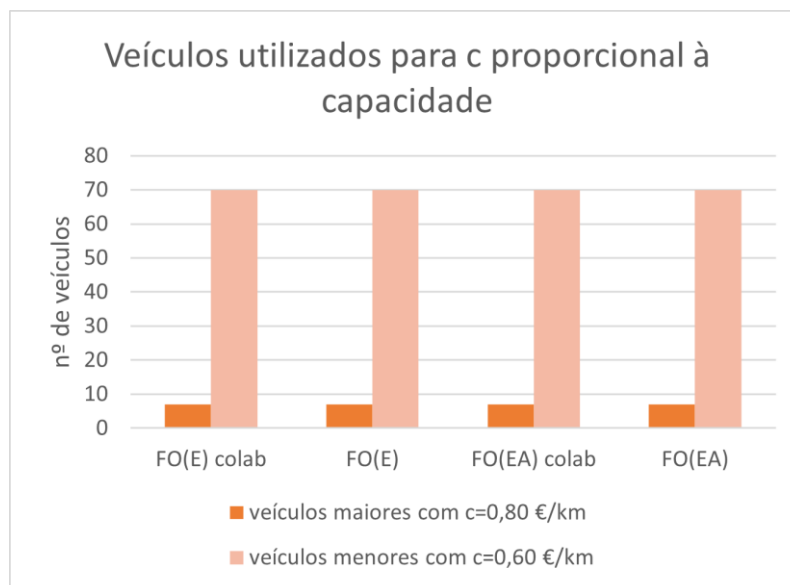


Figura 15 - Gráfico relativo ao nº de veículos de cada tipo utilizados quando o custo variável é proporcional à capacidade do veículo.

Com a diminuição dos custos variáveis associados aos veículos de menor capacidade, há claramente uma maior utilização destes, em oposição ao que acontece na simulação da instância base. Independentemente da função objetivo utilizada (económica ou mista), dos 77 veículos utilizados ao longo da semana, apenas 7 são veículos de maior dimensão. Esta diminuição da utilização dos veículos maiores vai originar consequentemente uma redução dos custos operacionais totais. No entanto, como essa redução de custos ocorre na mesma proporção em ambos os cenários (com e sem colaboração), não tem impacto no benefício da estratégia colaborativa.

5.3 Performance dos Métodos de Partilha de Benefícios

Obtidas as soluções para o problema de transporte colaborativo com base nas três funções objetivo consideradas, aplicaram-se os métodos de partilha de benefícios explicitados na secção 4.3 e compararam-se os resultados de forma a perceber-se qual a regra de alocação de ganhos mais justa e congruente no caso analisado.

Na Tabela 16 reúnem-se os custos operacionais que cada entidade obtém com a sua participação na colaboração, antes da distribuição de benefícios, assim como os custos comportados por cada organização na solução não colaborativa.

No cenário sem colaboração, os fornecedores entregam os seus produtos no entreposto do retalhista, e este abastece as suas lojas. Considerou-se que ambos subcontratam um serviço externo para a realização das respetivas entregas. Já o operador logístico comporta os custos que as viagens necessárias ao abastecimento dos seus clientes acarretam. Como especificado anteriormente, considera-se que os clientes em questão se encontram localizados muito próximos do entreposto do retalhista. Com a aplicação da estratégia colaborativa, os fornecedores passam a entregar as mercadorias no entreposto do operador logístico, reduzindo significativamente os quilómetros percorridos e, consequentemente, os custos operacionais. Por sua vez, as entregas nas lojas passam a ser realizadas pelo operador logístico, que, ao dirigir-se ao retalhista, aproveita a viagem de retorno para abastecer as lojas. Este desvio observado nas rotas do operador logístico leva a que este tenha de comportar um custo superior ao que comportaria anteriormente, sem a colaboração. Por outro lado, o retalhista deixa de ter custos neste

segundo cenário, uma vez que deixou de realizar as rotas necessárias ao abastecimento das suas lojas.

Tabela 16 - Custos a suportar por cada uma das entidades em cada um dos cenários (com e sem colaboração).

	Custo sem Colaboração [€]	Custo com Colaboração [€]	Diferença
Retalhista	20 024,13	0	20 024,13
Operador Logístico	17 696,72	20 089,13	-2 392,42
F1	479,38	193,44	285,94
F2	62,02	14,70	47,32
F3	16,57	7,57	9,00
F4	16,78	10,29	6,49
F5	53,76	39,83	13,93
F6	90,76	33,08	57,68

Somando-se todos os ganhos individuais que advêm do cenário colaborativo, obtém-se um benefício total da colaboração de 20 388,05 €. Da aplicação do MP1, que dita uma distribuição uniforme dos ganhos pelos diversos participantes, resulta um valor a alocar de 2 555,56 €, o que significa que o prejuízo arcado pelo operador logístico é coberto pelo benefício que alcança depois da distribuição dos ganhos da colaboração, e, por este motivo, a utilização do MP2 deixa de fazer sentido. No entanto, observando-se a Tabela 17, percebe-se que, apesar de não haver prejuízo para nenhuma das entidades, a aplicação do MP1 resulta numa discrepância de lucros gritante, com o retalhista e o operador logístico a alcançarem um ganho muito reduzido, perante os lucros elevadíssimos conseguidos pelos fornecedores.

Tabela 17 - Resultados obtidos com o MP1.

	Valor Alocado [€]	Custo Final com MP1 [€]	Ganho [%]
Retalhista	2 555,56	17 468,57	13%
Operador Logístico	2 555,56	17 533,57	1%
F1	2 555,56	-2 076,18	533%
F2	2 555,56	-2 493,54	4 120%
F3	2 555,56	-2 538,99	15 422%
F4	2 555,56	-2 538,78	15 229%
F5	2 555,56	-2 501,80	4 754%
F6	2 555,56	-2 464,80	2 816%

Por sua vez, o MP3, ao distribuir o benefício global depois de se ter reembolsado o operador logístico pelo prejuízo resultante do cenário colaborativo, dita um benefício individual de 2 532,26 €. Observando-se a Tabela 18, conclui-se que o ganho obtido pelo operador logístico com este método é superior ao obtido com o MP1. Contudo, os fornecedores continuam a alcançar lucros exorbitantes, em contraste com os ganhos relativamente baixos do retalhista e do operador logístico. Esta discrepância de valores acontece porque os custos dos fornecedores representam uma porção muito reduzida da totalidade dos custos operacionais da rede de distribuição. Esta evidência pode gerar alguma relutância no retalhista e no operador logístico, uma vez que os fornecedores têm um benefício muito superior aos encargos que teriam sem a colaboração, resultando numa sobrecompensação destas entidades.

Tabela 18 - Resultados obtidos com o MP3.

	Valor Alocado [€]	Custo Final com MP3 [€]	Ganho [%]
Retalhista	2 256,51	17 767,62	11%
Operador Logístico	4 648,93	15 440,21	13%
F1	2 256,51	-1 777,13	471%
F2	2 256,51	-2 194,49	3 638%
F3	2 256,51	-2 239,94	13 617%
F4	2 256,51	-2 239,73	13 447%
F5	2 256,51	-2 202,75	4 198%
F6	2 256,51	-2 165,75	2 486%

Uma vez que nenhum dos métodos de distribuição de benefícios produziu uma solução satisfatória, tentou melhorar-se o MP3 com a imposição de tetos nos ganhos obtidos pelos fornecedores. Desta forma, voltou a aplicar-se a terceira regra de alocação, estipulando-se que o ganho que os fornecedores podem alcançar com a colaboração não ultrapassa os 100%. Ou seja, no máximo, os fornecedores conseguem cobrir na totalidade o custo operacional que têm ao entregar as suas mercadorias no entreposto do operador logístico. Os restantes benefícios são distribuídos de igual forma pelo retalhista e pelo operador logístico. Os resultados obtidos para esta variante do MP3 encontram-se registados na Tabela 19.

Com esta metodologia, o retalhista e o operador logístico conseguem uma redução de custos de 43% e 49%, respetivamente. Em comparação com os 11% e 13% registados anteriormente, a limitação dos ganhos distribuídos pelos fornecedores acaba por tornar a colaboração mais vantajosa e atrativa para todos os participantes. Num problema de partilha de benefícios, o facto de algumas das entidades conseguirem cobrir na totalidade os seus custos operacionais pode, ainda assim, ser um fator questionável por alguns dos potenciais participantes na colaboração. Contudo, perante os resultados obtidos com cada um dos métodos testados, considera-se que a imposição de um limite no benefício recebido pelos participantes cuja contribuição nos custos operacionais totais é relativamente reduzida, em conjunto com a aplicação do método MP3, pode resultar numa boa estratégia para a eliminação da sobrecompensação de certos participantes e para uma partilha de benefícios mais estável.

Tabela 19 - Resultados obtidos com a imposição de tetos de 100% no MP3.

	Valor Alocado [€]	Custo Final com MP3 com tetos [€]	Ganho [%]
Retalhista	8 666,40	11 357,73	43%
Operador Logístico	8 666,40	9 030,32	49%
F1	479,38	0,00	100%
F2	62,02	0,00	100%
F3	16,57	0,00	100%
F4	16,78	0,00	100%
F5	53,76	0,00	100%
F6	90,76	0,00	100%

Adicionalmente, testou-se a aplicação de outros tetos no terceiro método de partilha de benefícios, de forma a que alguns dos participantes não permaneçam totalmente isentos de encargos relativos à entrega das suas mercadorias. Assim, estabeleceu-se que o ganho percentual máximo dos fornecedores corresponde à soma das percentagens obtidas na aplicação de tetos de 100% no MP3, dividida pelo número total de participantes, ou seja, $(43\% + 49\% + 6 \times 100\%) / 8 = 86,5\%$. Depois de alocado este ganho máximo aos fornecedores, distribuiu-se de igual forma o restante benefício pelo retalhista e pelo operador logístico. Na Tabela 20 encontram-se os resultados obtidos para este outro método proporcional de distribuição de benefícios pelos participantes da colaboração. Neste caso, a sobrecompensação dos fornecedores é atenuada com a imposição de um ganho percentual mais baixo, o que acaba por beneficiar ligeiramente o retalhista e o operador logístico, e por tornar a partilha de benefícios mais estável.

Tabela 20 - Resultados obtidos com a imposição de tetos no MP3.

	Valor Alocado [€]	Custo Final com MP3 com tetos [€]	Ganho [%]
Retalhista	8 714,84	11 309,30	43,5%
Operador Logístico	8 714,84	8 981,88	49,2%
F1	414,82	64,57	86,5%
F2	53,67	8,35	86,5%
F3	14,34	2,23	86,5%
F4	14,52	2,26	86,5%
F5	46,52	7,24	86,5%
F6	78,54	12,22	86,5%

6 Conclusões e Trabalho Futuro

Dada a competitividade presente nos vários setores industriais e a crescente exigência dos consumidores, as empresas procuram constantemente novos métodos que melhorem o seu desempenho e destaquem a sua posição no mercado. Nas últimas décadas, várias organizações têm procurado melhorar a sua eficiência através da aplicação de estratégias de colaboração, nomeadamente no âmbito do transporte colaborativo. Neste sentido, o presente projeto surgiu motivado por um caso de estudo de uma cadeia de abastecimento alimentar, com o intuito de analisar um caso de colaboração lateral entre um grande retalhista, um operador logístico e um conjunto de fornecedores. Para isso, desenvolveu-se um modelo matemático capaz de resolver o problema de definição de rotas com *cross-docking* colaborativo entre as empresas.

Os custos operacionais que advêm do transporte dos produtos numa cadeia de abastecimento constituem, geralmente, a maior porção dos custos logísticos totais. Além disso, o transporte assume um peso elevado no impacto ambiental de uma CA. Desta forma, revelou-se necessária a definição de uma solução de transporte colaborativo que focasse tanto a sustentabilidade económica como ambiental. Com esse propósito, formulou-se o problema de definição de rotas com base num *Vehicle Routing Problem with Backhauls* existente na literatura, adicionando-se entregas periódicas e frota heterogénea, sob três funções objetivo: minimização de custos operacionais (função objetivo económica), minimização de consumos de combustível (função objetivo ambiental) e minimização da soma dos custos operacionais e dos custos associados às emissões de CO₂ (função objetivo mista).

Os resultados registados revelam a obtenção de soluções semelhantes para as três funções objetivo, verificando-se a principal diferença nos tipos de veículos utilizados e, conseqüentemente, nos litros de combustível consumido. O impacto da colaboração evidenciou-se principalmente nos consumos de combustível, com valores de sinergia na ordem dos 13%, o que perfaz uma poupança de quase 5 570 litros por mês, o equivalente a uma redução mensal de 13 000 kg de CO₂. Os custos operacionais diminuem de forma menos impactante, com uma sinergia de 2%, o que, ainda assim, se traduz numa redução de cerca 1 600 € por mês.

O cenário colaborativo mostrou-se vantajoso para todos os fornecedores considerados no problema, mesmo para aqueles que entregam poucas quantidades. Isso deve-se sobretudo ao facto de os fornecedores estarem localizados bastante mais próximos do entreposto do operador logístico do que do retalhista. Para que a participação deixasse de compensar para algum dos fornecedores, seria necessária uma diminuição praticamente irrealista do custo do serviço de transporte externo subcontratado por estes, ou, por outro lado, um aumento considerável do custo de *cross-docking*. Em suma, estes dois parâmetros revelaram ser os que mais influência têm na determinação do número de participantes na colaboração, quando realizadas simulações com a função objetivo económica. Por outro lado, utilizando-se a função ambiental, o número de fornecedores é selecionado apenas com base na sua distância a cada um dos entrepostos. No caso prático estudado, como todos os fornecedores se encontram mais próximos do entreposto do operador logístico do que do entreposto do retalhista, as soluções obtidas com esta função objetivo incluem sempre a participação de todos os fornecedores.

Para a resolução do problema de partilha de benefícios foram considerados três métodos proporcionais da literatura. O terceiro método, que dita o reembolso de eventuais prejuízos que advenham da estratégia colaborativa antes de se distribuírem os benefícios, é o que obtém melhores resultados de entre os métodos revistos. No entanto, como os custos comportados pelos fornecedores, na sua totalidade, representam uma porção reduzida dos custos totais da rede de distribuição analisada, a distribuição dos benefícios por aplicação de qualquer um destes métodos acaba por originar ganhos muito díspares, com a sobrecompensação das entidades que contribuem em menor percentagem para o benefício global da colaboração. Esta situação foi contornada com a imposição de tetos nos ganhos auferidos pelos participantes sobrecompensados, o que conferiu mais estabilidade e consistência à resolução do problema.

A partilha de benefícios revelou-se a temática mais difícil de abordar no presente trabalho. Uma organização só tem interesse em colaborar com outra, se obtiver vantagens aliantes com a sua participação na estratégia colaborativa. Além disso, assim como um maior número de participantes origina, normalmente, um maior benefício global, o facto de se distribuir os ganhos por mais empresas pode reduzir significativamente o ganho alocado por entidade, tornando a colaboração menos apelativa. Concluiu-se que uma distribuição equilibrada e justa dos lucros é um processo moroso e complexo, e que dificilmente se consegue por aplicação de uma única regra. Como trabalho futuro, salienta-se a relevância da aplicação de outros métodos de partilha de benefícios, como por exemplo métodos proporcionais às cargas entregues ou às distâncias viajadas, ou até mesmo métodos que envolvam a elaboração de modelos de otimização.

O modelo matemático desenvolvido para a resolução do VRP colaborativo pode, também, ser enriquecido com a introdução de outras variantes que o aproximem do caso real, tais como a permissão de mais que uma visita diária a cada loja e a introdução de janelas temporais. Adicionalmente, a consideração de variáveis como os pesos das cargas e as velocidades médias a que os veículos circulam em cada arco valorizam a abordagem do problema numa perspetiva ambiental. Focando mais especificamente no caso de estudo, seria, também, interessante perceber-se de que forma a integração de outros entrepostos do retalhista beneficiaria a colaboração.

Além das conclusões obtidas com a análise dos resultados alcançados, salienta-se a importância que o presente projeto teve na perceção pessoal acerca das dificuldades enfrentadas num caso de investigação operacional, desde a recolha de dados e a comunicação com as diferentes entidades envolvidas, a tomada de decisões, a consideração e definição dos vários parâmetros e variáveis do problema até ao desenvolvimento de modelos de otimização eficazes e sua implementação.

Referências

- Adekomaya, O., Jamiru, T., Sadiku, R., & Huan, Z. (2016). Sustaining the shelf life of fresh food in cold chain - A burden on the environment. In *Alexandria Engineering Journal* (Vol. 55, Issue 2, pp. 1359–1365). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.03.024>
- Agustina, D., Lee, C. K. M., & Piplani, R. (2010). A review: Mathematical models for cross docking planning. *International Journal of Engineering Business Management*, 2(2), 47–54. <https://doi.org/10.5772/9717>
- Ahmadizar, F., Zeynivand, M., & Arkat, J. (2015). Two-level vehicle routing with cross-docking in a three-echelon supply chain: A genetic algorithm approach. *Applied Mathematical Modelling*, 39(22), 7065–7081. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.03.005>
- Alizadeh Foroutan, R., Rezaeian, J., & Mahdavi, I. (2020). Green vehicle routing and scheduling problem with heterogeneous fleet including reverse logistics in the form of collecting returned goods. *Applied Soft Computing Journal*, 94, 106462. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106462>
- Allaoui, H., Guo, Y., & Sarkis, J. (2019). Decision support for collaboration planning in sustainable supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 229, 761–774. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.367>
- Aloui, A., Derrouiche, R., Hamani, N., Delahoche, L., & Aloui, A. (2020). *COLLABORATION HORIZONTALE DURABLE DES RESEAUX DE TRANSPORT DE MARCHANDISES: ETAT DE L'ART ET PERSPECTIVES*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03028806>
- Aykin, T. (1995). The hub location and routing problem. *European Journal of Operational Research*, 83(1), 200–219. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)E0173-U](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)E0173-U)
- Baldacci, R., Bartolini, E., Mingozzi, A., & Valletta, A. (2011). An exact algorithm for the period routing problem. *Operations Research*, 59(1), 228–241. <https://doi.org/10.1287/opre.1100.0875>
- Barth, M., Younglove, T., & Scora, G. (2005). Development of a Heavy-Duty Diesel Modal Emissions and Fuel Consumption Model. *Undefined*.
- Barth, Matthew, & Boriboonsomsin, K. (2009). Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(6), 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.01.004>
- Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1232–1250. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004>
- Beltrami, E. J., & Bodin, L. D. (1974). Networks and vehicle routing for municipal waste collection. *Networks*, 4(1), 65–94. <https://doi.org/10.1002/net.3230040106>
- Caceres-cruz, J., Riera, D., Juan, A. A., Arias, P., Guimarans, D., & Caceres-Cruz, J. (2014).

- Rich Vehicle Routing Problem. *Survey. ACM Comput. Surv.* V, N, Article A, 29. <https://doi.org/10.1145/0000000.0000000>
- Campbell, A. M., & Wilson, J. H. (2014). Forty years of periodic vehicle routing. *Networks*, 63(1), 2–15. <https://doi.org/10.1002/net.21527>
- Cattaruzza, D., Absi, N., Feillet, D., & González-Feliu, J. (2017). Vehicle routing problems for city logistics. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 6(1), 51–79. <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0074-0>
- Chao, I. -M, Golden, B. L., & Wasil, E. (1995). An improved heuristic for the period vehicle routing problem. *Networks*, 26(1), 25–44. <https://doi.org/10.1002/net.3230260104>
- Chopra, S., Meindl, P., Columbus, B., New, I., San, Y., Upper, F., River, S., Cape, A., Dubai, T., Madrid, L., Munich, M., Montreal, P., Delhi, T., Sao, M. C., Sydney, P., Kong, H., Singapore, S., & Tokyo, T. (2013). *Supply Chain Management STRATEGY, PLANNING, AND OPERATION Fifth Edition*.
- Christofides, N., & Beasley, J. E. (1984). The period routing problem. *Networks*, 14(2), 237–256. <https://doi.org/10.1002/net.3230140205>
- Christopher, M. (2011). *LOGISTICS & SUPPLY CHAIN MANAGEMENT* (Fourth). www.pearson-books.com
- Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 12(4), 568–581. <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
- Costa, J. P., Dias, J. M., & Godinho, P. (2010). *Logística*. Imprensa da Universidade de Coimbra.
- CSCMP. (2013). *SUPPLY CHAIN MANAGEMENT TERMS and GLOSSARY*. https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx
- Danloup, N., Mirzabeiki, V., Allaoui, H., Goncalves, G., Julien, D., & Mena, C. (2015). Reducing transportation greenhouse gas emissions with collaborative distribution: A case study. *Management Research Review*, 38(10), 1049–1067. <https://doi.org/10.1108/MRR-11-2014-0262>
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. In *Source: Management Science* (Vol. 6, Issue 1).
- Defryn, C., Vanovermeire, C., & Sörensen, K. (2016). Gain sharing in horizontal logistic cooperation: A case study in the fresh fruit and vegetables sector. In *Contributions to Management Science* (pp. 75–89). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17419-8_4
- Deif, I., & Bodin, L. (1984). Extension of the Clarke and Wright algorithm for solving the vehicle routing problem with backhauling. *Proceedings of the Babson Conference on Software Uses in Transportation and Logistics Management*, 75–96.
- Dekker, R., Bloemhof, J., & Mallidis, I. (2012). Operations Research for green logistics - An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research*, 219(3), 671–679. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.11.010>
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for the Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 346–359. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.06.044>
- Eurostat. (2019). *Freight transport statistics - modal split. April 2019*, 1–11. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics->

explained/index.php?title=Freight_transport_statistics_-_modal_split

- Faulin, J., Juan, A., Lera, F., & Grasman, S. (2011). Solving the capacitated vehicle routing problem with environmental criteria based on real estimations in road transportation: A case study. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 323–334. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.038>
- Fernández, E., Fontana, D., & Speranza, M. G. (2016). On the Collaboration Uncapacitated Arc Routing Problem. *Computers and Operations Research*, 67, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.10.001>
- Gansterer, M., & Hartl, R. F. (2018). Collaborative vehicle routing: A survey. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 268, Issue 1, pp. 1–12). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.023>
- Golden, B., Assad, A., Levy, L., & Gheysens, F. (1984). The fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 11(1), 49–66. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0305-0548\(84\)90007-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0305-0548(84)90007-8)
- Golden, B., Raghavan, S., & Wasil, E. (2008). The vehicle routing problem: Latest advances and new challenges. In *Operations Research/ Computer Science Interfaces Series* (Vol. 43). <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8>
- Guajardo, M., & Rönnqvist, M. (2016). A review on cost allocation methods in collaborative transportation. *International Transactions in Operational Research*, 23(3), 371–392. <https://doi.org/10.1111/itor.12205>
- INE. (2019). *Repartição modal do transporte de mercadorias dos transportes terrestre e fluvial por Localização geográfica e Modos de transporte*. https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0009196&contexto=pi&selTab=tab0
- Irnich, S. (2000). Multi-depot pickup and delivery problem with a single hub and heterogeneous vehicles. *European Journal of Operational Research*, 122(2), 310–328. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00235-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00235-0)
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2014). The fleet size and mix pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 239–254. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.09.008>
- Kreng, V. B., & Chen, F. T. (2008). The benefits of a cross-docking delivery strategy: A supply chain collaboration approach. *Production Planning and Control*, 19(3), 229–241. <https://doi.org/10.1080/09537280801916157>
- Kwon, Y. J., Choi, Y. J., & Lee, D. H. (2013). Heterogeneous fixed fleet vehicle routing considering carbon emission. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 23, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.04.001>
- Labadie, N., Prins, C., & Prodhon, C. (2016). Metaheuristics for vehicle routing problems- Wiley-ISTE (2016) Labadie. *Wiley-ISTE*, 3, 225.
- le Blanc, H. M., Cruijssen, F., Fleuren, H. A., & de Koster, M. B. M. (2006). Factory gate pricing: An analysis of the Dutch retail distribution. *European Journal of Operational Research*, 174(3), 1950–1967. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.04.020>
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., Chung, S. H., & Lam, H. Y. (2014). Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41(4 PART 1), 1118–1138. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.107>
- Liu, G., Hu, J., Yang, Y., Xia, S., & Lim, M. K. (2020). Vehicle routing problem in cold Chain logistics: A joint distribution model with carbon trading mechanisms. *Resources*,

- Conservation and Recycling*, 156, 104715.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104715>
- Liu, P., Wu, Y., & Xu, N. (2010). Allocating Collaborative Profit in Less-than-Truckload Carrier Alliance. *Journal of Service Science and Management*, 03(01), 143–149.
<https://doi.org/10.4236/jssm.2010.31018>
- Lunday, B. J., & Robbins, M. J. (2019). Collaboratively-developed vaccine pricing and stable profit sharing mechanisms. *Omega (United Kingdom)*, 84, 102–113.
<https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.04.007>
- McKinnon, A., & Edwards, J. (2010). Opportunities for improving vehicle utilization. *Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics*, 195–213.
- Mentzer, J. T., Dewitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). DEFINING SUPPLY CHAIN MANAGEMENT. In *JOURNAL OF BUSINESS LOGISTICS* (Vol. 22, Issue 2).
- Muñoz-Villamizar, A., Solano-Charris, E. L., Santos, J., & Montoya-Torres, J. R. (2019). Measuring environmental impact of collaborative urban transport networks: A case study. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11756 LNCS, 53–66.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-31140-7_4
- Özener, O. Ö. (2014). Developing a Collaborative Planning Framework for Sustainable Transportation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.
<https://doi.org/10.1155/2014/107102>
- Özener, O. Ö., & Ergun, Ö. (2008). Allocating costs in a collaborative transportation procurement network. *Transportation Science*, 42(2), 146–165.
<https://doi.org/10.1287/trsc.1070.0219>
- Özener, O. Ö., Ergun, Ö., & Savelsbergh, M. (2013). Allocating cost of service to customers in inventory routing. *Operations Research*, 61(1), 112–125.
<https://doi.org/10.1287/opre.1120.1130>
- Penna, P. H. V., Subramanian, A., & Ochi, L. S. (2013). An iterated local search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Journal of Heuristics*, 19(2), 201–232.
<https://doi.org/10.1007/s10732-011-9186-y>
- Pradenas, L., Oportus, B., & Parada, V. (2013). Mitigation of greenhouse gas emissions in vehicle routing problems with backhauling. *Expert Systems with Applications*, 40(8), 2985–2991. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.014>
- Rodrigue, J. P., Comtois, C., & Slack, B. (2016). The geography of transport systems. In *The Geography of Transport Systems*. <https://doi.org/10.4324/9781315618159>
- Russell, R., & Igo, W. (1979). An assignment routing problem. *Networks*, 9(1), 1–17.
<https://doi.org/10.1002/net.3230090102>
- Santos, M. J., Amorim, P., Marques, A., Carvalho, A., & Póvoa, A. (2020). The vehicle routing problem with backhauls towards a sustainability perspective: a review. *TOP*, 28(2), 358–401. <https://doi.org/10.1007/s11750-019-00534-0>
- Santos, M. J., Martins, S., Amorim, P., & Almada-Lobo, B. (2021). A green lateral collaborative problem under different transportation strategies and profit allocation methods. *Journal of Cleaner Production*, 288.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125678>
- Schmeidler, D. (1969). The Nucleolus of a Characteristic Function Game. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 17(6), 1163–1170. <https://doi.org/10.1137/0117107>

- Shapley, L. (1953). S. 1953. "A Value for N-Person Games." *Contributions to the Theory of Games*, 31–40.
- Subramanian, A., Penna, P. H. V., Uchoa, E., & Ochi, L. S. (2012). A hybrid algorithm for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 221(2), 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.03.016>
- Swenseth, S. R., & Godfrey, M. R. (2002). Incorporating transportation costs into inventory replenishment decisions. *International Journal of Production Economics*, 77(2), 113–130. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(01\)00230-4](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(01)00230-4)
- Taillard, É. D. (1999). A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP. *RAIRO - Operations Research*, 33(1), 1–14. <https://doi.org/10.1051/ro:1999101>
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). The Vehicle Routing Problem. In *SIAM*. <https://doi.org/10.1137/1.9780898718515>
- Toth, P., & Vigo, D. (2014). *Vehicle Routing - Problems, Methods, and Applications* (P. Toth & D. Vigo (eds.); 2nd Editio). Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpVRPMAE06/vehicle-routing-problems/vehicle-routing-problems>
- Tseng, Y., Yue, W. L., & Taylor, M. A. P. (2005). *The role of transportation in logistics chain*.
- Ubeda, S., Arcelus, F. J., & Faulin, J. (2011). Green logistics at Eroski: A case study. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.04.041>
- Venkataraman, R. R., & Pinto, J. K. (2018). *Operations Management: Managing Global Supply Chains*. SAGE Publications. <https://books.google.pt/books?id=hhh7DwAAQBAJ>
- Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Prins, C. (2013). Heuristics for multi-attribute vehicle routing problems: A survey and synthesis. *European Journal of Operational Research*, 231(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.02.053>
- Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I., & Xu, Y. (2012). Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, 39(7), 1419–1431. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.08.013>