

VRP dinâmico e de janelas de tempo aplicado ao planeamento de transportes

PEDRO AFONSO MOREIRA PEIXOTO DA CONCEIÇÃO OLIVEIRA
novembro de 2022

POLITÉCNICO DO PORTO
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

VRP dinâmico e de janelas de tempo aplicado ao planeamento de transportes

Pedro Afonso Moreira Peixoto da Conceição Oliveira

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Porto

Novembro, 2022

Esta dissertação satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial

Candidato: Pedro Afonso moreira Peixoto da Conceição Oliveira, nº 1170824, 1170824@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Maria Teresa Ribeiro Pereira, mtp@isep.ipp.pt

Coorientação: Marisa Oliveira, mjo@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto

Novembro, 2022

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer às professoras orientadoras, pelo apoio dado ao longo da realização da tese/dissertação.

Quero também agradecer à minha família, sobretudo aos meus pais, aos meus amigos e namorada, por me terem apoiado ao longo de toda esta caminhada, por me incentivarem e por tornarem tudo isto possível.

Resumo

Na sociedade moderna, com os avanços tecnológicos e a ambição e necessidade das empresas de se tornarem cada vez mais competitivas, todos os setores são afetados. O setor correspondente aos transportes nada se afasta dos demais, havendo, progressivamente, uma maior procura por transportes mais baratos e mais rápidos, aumentando assim a procura de soluções mais eficazes por parte das empresas que tratam dos mesmos.

Por sua vez, este trabalho tem como objetivo estudar e explicar os problemas de rotas de veículos (*VRP*), analisando duas das suas vertentes. A vertente dinâmica (*DVRP*) estuda a possibilidade do surgimento de clientes dinâmicos, bem como a necessidade da alteração de rotas. A vertente com a aplicação de janelas de tempo (*VRPTW*), estuda a realização das entregas, por parte dos fornecedores aos clientes, dentro de janelas de tempo anteriormente definidas (normalmente aquando da aquisição do produto ou pedido de entrega). Para a recolha da informação necessária para a melhor compreensão destes temas foram utilizadas várias plataformas online de partilha e publicação de documentos. Através da análise dos mesmos foram retiradas as ideias e conclusões apresentadas ao longo do documento.

A vertente da aplicação das janelas de tempo é mais bem analisada, uma vez que se analisa um caso de estudo encontrado num artigo e, posteriormente, desenvolve-se uma possível solução para os problemas de rotas de veículos com janelas de tempo.

O caso de estudo explorado teve como intuito perceber a relação existente entre a utilização de janelas de tempo com diferentes intervalos e os custos de encargo, a satisfação dos clientes e o tempo de viagem.

A solução apresentada, à semelhança do caso de estudo analisado, estuda a influência que as janelas de tempo têm nos custos das entregas. Através do mesmo é possível variar o número de veículos com os quais se trabalha, bem como as suas capacidades, o número de clientes servidos, o horário e procura dos mesmos e ainda o tamanho das janelas de tempo nas quais as entregas são realizadas.

Por fim, conclui-se que deve haver um equilíbrio das janelas de tempo, uma vez que as mesmas não devem ser muito pequenas, porque podem traduzir-se em custos mais elevados, nem muito grandes, uma vez que podem diminuir a satisfação dos clientes e aumentar o tempo de processamento. O tamanho e capacidade da frota utilizada deve ser de acordo com a quantidade e procura dos clientes, aos quais a empresa costuma atender.

Palavras-Chave: *VRP*, *DVRP*, *VRPTW*, solução *VRPTW*, otimização de custos, otimização de rotas

Abstract

In the modern society, with all the advances in technology and with the ambition and need from the companies to become more and more competitive, all the sectors are affected. The transport's sector is no different, once there is, more and more, a demand for cheaper and faster transports, increasing, this way, the search for more effective solutions from the companies that deal with deliveries.

In turn, the purpose of this paper is to study and explain the vehicle routing problem (VRP), analyzing two of its strands. The dynamic strand (DVRP) studies the possibility to arise new dynamic clients, as well as the need to change the routes initially planned. The strand that studies the application of time windows, analyzes the deliveries that are done within the time windows previously defined (normally when the product is bought, or the delivery is requested). To recall all the information needed to a better understanding of these topics were used multiple online platforms for sharing and publishing documents. Through their analysis, the ideas and conclusions presented along this document were withdrawn.

The time windows strand was better analyzed, once it was found and examined a case study and, posteriorly, a possible solution was developed to solve the VRPTW vehicle routing problems with time windows.

The case study was explored with the aim of understanding the relationship between the use of time windows with different intervals and the cost of charges, customer satisfaction and travel time.

The solution presented, similar to the case study investigated, studies the influence that time windows have on delivery costs. In it, it is possible to vary the number of vehicles with which to work, as well as their capacities, the number of customers served, their schedule and demand and the size of the time windows in which deliveries are made.

In conclusion, there should be a balance in the time windows, once they should not be either too small, because they can translate in higher costs, neither too long, once they can decrease customer satisfaction or increase process time. The size and the capacity of the vehicle fleet should be according to the amount of clientes and their demand.

Keywords: VRP, DVRP, VRPTW, VRPTW solution, cost optimization, route optimization

Índice

1	Introdução.....	14
1.1	Objetivos.....	15
1.2	Metodologia.....	15
1.3	Organização do trabalho.....	15
2	Revisão da Literatura.....	16
2.1	Definição das palavras-chave.....	16
2.2	Fontes de publicação - jornais e revistas científicas.....	20
2.3	Abrangência da pesquisa no tempo.....	22
2.4	Áreas de Pesquisas.....	24
2.5	Contributos de publicação na área por país.....	25
2.6	Documentos Analisados.....	27
2.6.1	Vehicle Routing Problem.....	28
2.6.2	Dynamic Vehicle Routing Problem.....	32
2.6.3	Vehicle Routing Problem with Time Windows.....	37
3	Análise do impacto das janelas temporais no TSP.....	40
4	Modelo de Programação Linear para o VRPTW.....	42
5	Resultados Obtidos.....	45
5.1	Programa Utilizado.....	45
5.2	Análise do Impacto das Janelas Temporais no VRP.....	45
5.2.1	Instância 1 – Baixa Capacidade e Baixa Procura.....	46
5.2.2	Instância 2 – Capacidade Média e Procura Baixa.....	48
5.2.3	Instância 3 – Capacidade Média e Procura Média.....	50
5.2.4	Instância 4 – Alta Capacidade e Baixa Procura.....	52
5.2.5	Instância 5 – Alta Capacidade e Procura Média.....	54
5.2.6	Instância 6 – Alta Capacidade e Alta Procura.....	56
5.3	Resumo e Comparação dos Resultados das Instâncias.....	58
6	Conclusão.....	60
7	Trabalho Futuro.....	62
	Referências.....	63

Lista de Siglas/Abreviaturas

ACO	–	Algoritmo de otimização por Colónia de Formigas
API	–	Application Programming Interface
AS	–	Ant Systems
CVRP	–	Capacitated Vehicle Routing Problem
DA	–	Deterministic Annealing
DDVRP	–	Dynamic Demand & Real-Time Traffic Information based Vehicle Routing Problem
DDVRP	–	Dynamic Demand based Vehicle Routing Problem
DDVRPPD	–	Dynamic Demand Vehicle Routing Problem with Pickup & Delivery
DVRP	–	Dynamic Vehicle Routing Problem
DVRPSTW	–	Dynamic Vehicle Routing Problem with Time Windows
EA	–	Algoritmos Evolucionários
EDI	–	Electronic Data Interchange
GA	–	Genetic Algorithms
GAMS	–	General Algebraic Modeling System
GIS	–	Geographic Information System
GPS	–	Global Positioning System
ISEP	–	Instituto Superior de Engenharia do Porto
IVHS	–	Intelligent Vehicle Highway System
MDPI	–	Multidisciplinary Digital Publishing Institute

- MDVRP – Multiple Depósito Vehicle Routing Problem
- NN – Neural Networks
- NP – Nondeterministic Polynomial
- PSO – Particle Swarm Optimization
- RTVRP – Real-time traffic information based Vehicle Routing Problem
- SA – Simulated Annealing
- SDVRP – Split Delivery Vehicle Routing Problem
- TS – Tabu Search
- TSP – Travelling Salesman Problem
- TSPTW – Travelling Salesman Problem with Time Windows
- VRP – Vehicle Routing Problem
- VRPTW – Vehicle Routing Problem with Time Windows
- WoS – Web of Science

Índice de Figuras

Figura 1 - Mapa das Palavras-Chave via VV relacionadas com “DVRP”	17
Figura 2 - Mapa das Palavras-Chave utilizadas pelo menos uma vez.....	18
Figura 3 - Mapa das Palavras-Chave com mais relevância	18
Figura 4 - Mapa das Palavras-Chave relacionadas com "VRPTW"	19
Figura 5 - Mapa Filtrado das Palavras-Chave com mais relevância	20
Figura 6 - Jornais e Revistas com maior número de publicações no tema DVRP	21
Figura 7 - Jornais e Revistas com maior número de publicações no tema “VRPTW” ..	22
Figura 8 - Anos com maior número de publicações no tema DVRP	23
Figura 9 - Anos com maior número de publicações no tema "VRPTW"	24
Figura 10 - Áreas de pesquisa que mais abordam o tema DVRP	25
Figura 11 - Áreas de pesquisa que mais abordam o tema VRPTW	25
Figura 12 - Países mais interpeladores do tema Dynamic Vehicle Routing Problem	26
Figura 13 - Países mais interpeladores do tema Vehicle Routing Problem with Time Windows.....	27
Figura 14 - Exemplo de um diagrama Vehicle Routing Problem	29
Figura 15 - Exemplo de um diagrama Dynamic Vehicle Routing Problem.....	33

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Tempo de Viagem entre Clientes	46
Tabela 2 - Baixa Procura dos Clientes.....	46
Tabela 3 - Janelas de Tempo de 30 minutos.....	47
Tabela 4 - Janelas de Tempo de 90 minutos.....	47
Tabela 5 - Janelas de Tempo de 180 minutos.....	47
Tabela 6 - Janelas de Tempo de 240 minutos.....	47
Tabela 7 - Janelas de tempo de 480 minutos	47
Tabela 8 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 30 minutos (Baixa Capacidade e Baixa Procura)	47
Tabela 9 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 30 minutos (Capacidade Média e Baixa Procura)	48
Tabela 10 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 90 minutos (Capacidade Média e Baixa Procura)	49
Tabela 11 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 180 minutos (Capacidade Média e Baixa Procura)	49
Tabela 12 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 240 minutos (Capacidade Média e Baixa Procura)	50
Tabela 13 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 480 minutos (Capacidade Média e Baixa Procura)	50
Tabela 14 - Procura Média dos Clientes.....	51
Tabela 15 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 30 minutos (Capacidade Média e Procura Média)	51
Tabela 16 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 30 minutos (Alta Capacidade e Baixa Procura)	52
Tabela 17 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 90 minutos (Alta Capacidade e Baixa Procura)	52
Tabela 18 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 180 minutos (Alta Capacidade e Baixa Procura)	53
Tabela 19 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 240 minutos (Alta Capacidade e Baixa Procura)	53
Tabela 20 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 480 minutos (Alta Capacidade e Baixa Procura)	54

Tabela 22 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 90 minutos (Alta Capacidade e Procura Média)	55
Tabela 23 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 180 minutos (Alta Capacidade e Procura Média)	55
Tabela 24 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 240 minutos (Alta Capacidade e Procura Média)	55
Tabela 25 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 480 minutos (Alta Capacidade e Procura Média)	56
Tabela 26 - Alta Procura dos Clientes	56
Tabela 27 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 30 minutos (Alta Capacidade e Alta Procura).....	57
Tabela 28 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 90 minutos (Alta Capacidade e Alta Procura).....	57
Tabela 29 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 480 minutos (Alta Capacidade e Alta Procura).....	58
Tabela 30 - Resumo dos Resultados Obtidos para um número de clientes fixo	59

1 Introdução

No âmbito da unidade curricular de Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores – Sistemas e Planeamento Industrial, do Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEE), do Instituto Superior de Engenharia do Porto, os temas “*Dynamic Vehicle Routing Problem*” e “*Vehicle Routing Problem with Time Windows*” serão abordados ao longo deste documento. Para tal, primeiramente é possível encontrar uma breve contextualização ao tema e, posteriormente, uma exposição da informação encontrada ao longo dos documentos utilizados, bem como, um caso de estudo considerado e uma solução para um problema do tipo “*Vehicle Routing Problem with Time Windows*”.

A exploração de técnicas e de soluções ótimas para a resolução de problemas de roteamento de veículos está em constante evolução, devido ao facto das empresas necessitarem de constantemente oferecer soluções mais eficientes de transporte quer de encomendas, quer de mercadorias, quer de pessoas, tornando ao mesmo tempo mais barato para os clientes em questão e, também, diminuindo os custos de encargo da empresa mantendo ou aumentando o nível de serviço ao cliente.

A transformação digital, a concorrência nesta área e a maior exigência por parte dos clientes no que toca a comodidades e prazos para entregas de produtos, resulta em que os problemas de roteamento, *Vehicle Routing Problem (VRP)*, tenham cada vez mais impacto nos resultados operacionais nas empresas de distribuição e nas cadeias de abastecimento. Atualmente, a tecnologia disponível e a necessidade de decisão em tempo real têm dado especial enfoque nos roteamentos dinâmicos.

O *VRP* consiste em encontrar o conjunto de rotas de menor custo para um conjunto de veículos, de modo a satisfazer a procura total de um conjunto de clientes geograficamente dispersos numa rede [1].

Com o passar do tempo foram surgindo extensões e variantes ao *VRP*. Entre estes encontram-se os dois que são explorados ao longo deste documento. O primeiro, *Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP)* que tem por base a definição de *VRP*, sendo que acrescenta uma vertente dinâmica ao mesmo pela incorporação em tempo real dos parâmetros do modelo que impactam na função objetivo e, consequentemente, nos resultados do modelo. Uma das características destes problemas é a adaptação do modelo à existência de contratemplos, alterações ou até mesmo novos clientes, ao longo da distribuição a realizar, adaptando a rota ótima. O segundo, *Vehicle Routing Problem with*

Time Windows (VRPTW), consiste na aplicação e no cumprimento de janelas de tempo impostas pelos fornecedores/clientes, tendo por base o conceito de *VRP*.

1.1 Objetivos

O objetivo desta dissertação é a exploração de roteamentos dinâmicos e a análise do impacto das janelas temporais em problemas de distribuição nas cadeias de abastecimento.

1.2 Metodologia

A metodologia para realizar esta dissertação consiste numa revisão de literatura referente aos modelos de roteamento e suas variantes com enfoque nos modelos para roteamento dinâmico e/ou com janelas temporais.

Será desenvolvido um modelo que permite verificar o impacto das janelas temporais numa solução.

Será criado um conjunto de instâncias que permite validar o impacto das janelas temporais nos custos operacionais e a importância da sua negociação na distribuição das cadeias de abastecimento.

1.3 Organização do trabalho

Neste capítulo faz-se uma introdução, definem-se os objetivos, apresenta-se a metodologia delineada para realização desta dissertação e apresenta-se a organização da mesma.

No capítulo 2 faz-se uma revisão de literatura no âmbito do roteamento e modelos de roteamento.

No capítulo 3 é apresentado um caso de estudo que aborda, em parte, a solução a desenvolver no modelo.

No capítulo 4 apresenta-se o modelo com janelas temporais.

No capítulo 5 apresentam-se um conjunto de instâncias que permitem validar o impacto da negociação das janelas temporais na logística e cadeia de abastecimento.

No capítulo 6 faz-se a conclusão desta dissertação e apresenta-se o trabalho futuro.

2 Revisão da Literatura

De modo a realizar o presente trabalho, foram utilizadas diferentes bases de dados (as quais serão abordadas de seguida) que contêm um grande leque de documentos e artigos publicados relativos aos mais variados temas, e de onde é possível obter todos os dados de um determinado artigo escolhido (autores, citações, ano de publicação, indicadores de relevância e local de publicação).

Entre as bases de dados utilizadas encontram-se: *Web of Science (WoS)*, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, *Science Direct*, *Wiley* e *Springer*.

A plataforma *WoS* é de acesso pago, pelo que é possível aceder aos documentos fornecidos pela mesma a partir do ISEP. As restantes plataformas são de acesso livre, pelo que é possível aceder à maior parte dos documentos publicados nas mesmas de forma gratuita. Assim, foram utilizadas todas as plataformas mencionadas, de modo a aumentar a quantidade de documentos aos quais se poderia ter acesso, e ampliando, por sua vez, a informação que seria possível recolher, respetiva a um determinado tema, no caso em questão, “*DVRP*” e “*VRPTW*”.

Uma outra ferramenta utilizada para a realização deste trabalho foi o *VOSviewer*, que permite aos utilizadores, a partir de um conjunto de documentos, obter informações acerca dos mesmos, como por exemplo quais são os autores que têm mais publicações, quais as organizações com um maior número de publicações associadas às palavras-chave pesquisadas e ainda quais são outras palavras-chave mais utilizadas pelos autores. Desta forma é possível obter uma melhor leitura em relação ao tema que se pretende abordar e ainda tornar a pesquisa mais específica e objetiva.

2.1 Definição das palavras-chave

Neste cenário, foi realizada uma pesquisa inicial a partir da plataforma *WoS* de modo a identificar alguns dos documentos relacionados com o tema *Dynamic VRP*. Para tal, na plataforma de pesquisa foi somente utilizada a palavra-chave *Dynamic VRP* tendo sido encontrado um grupo de 295 artigos. Este grupo foi então exportado para o *VOSviewer* e analisado a partir do mesmo, de forma a obter outras palavras-chave associadas ao tema em questão e que fossem também relevantes para os autores dos artigos seleccionados. Desta forma, foi obtida a Figura 1:

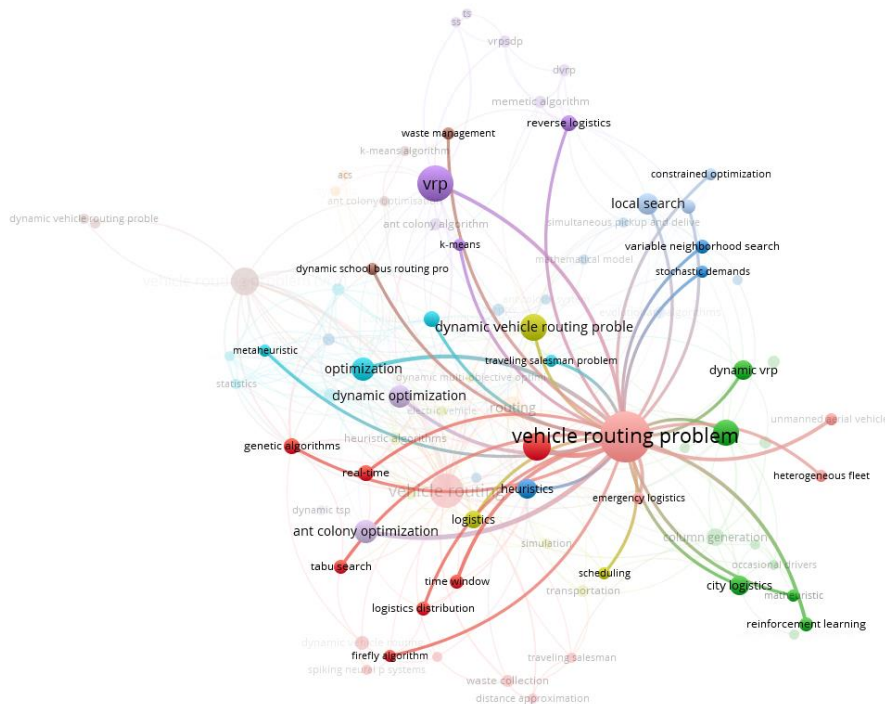


Figura 1 - Mapa das Palavras-Chave via VV relacionadas com “DVRP”

Através da observação do mapa criado pela ferramenta *VOSviewer*, podemos verificar, claramente, que a palavra-chave mais utilizada é “*vehicle routing problem*”. Através das ligações criadas e em destaque, é possível observar a relevância de outras palavras-chave como “*dynamic optimization, dynamic vehicle routing problem, ant colony, optimization*”, entre outros.

Foi ainda realizada uma outra pesquisa mais objetiva onde foi somente utilizada a palavra-chave “*Dynamic VRP*” de onde se retirou uma lista de apenas 22 artigos.

Através das palavras-chave obtidas na pesquisa acima mencionada, optou-se então, por realizar uma pesquisa alternativa, com ajuda das professoras orientadoras, a partir das outras plataformas, previamente referidas.

A primeira plataforma a ser utilizada foi a *MDPI*, de onde foi retirado somente um documento ao utilizar as palavras-chave *VRP, Dynamic Vehicle Routing Problem, optimization, transportation, case study*.

Posteriormente, foi realizada uma outra pesquisa a partir da plataforma *Science Direct*. Ao serem utilizadas as mesmas palavras-chave, foi encontrado e selecionado um conjunto de 10 documentos.

Uma outra empresa de publicações académicas foi consultada, denominada de *Wiley*, a partir da qual se obteve um leque de 9 artigos.

Finalmente foi ainda consultada a plataforma *Springer* de onde foram retirados os últimos 10 documentos de possível análise.

De modo a se conseguir fazer uma análise mais objetiva às palavras-chave utilizadas, optou-se por pesquisar, a partir do *Web of Science*, os documentos selecionados através das diferentes plataformas. Desta forma seria possível identificar tanto as palavras-chave utilizadas, como todos os outros dados mencionados no capítulo 2. A partir dessa pesquisa, e da exportação dos artigos para o *VOSviewer*, realizaram-se, por sua vez, dois mapas distintos com as palavras-chave mais utilizadas, apresentados de seguida, na Figura 2 e na Figura 3.

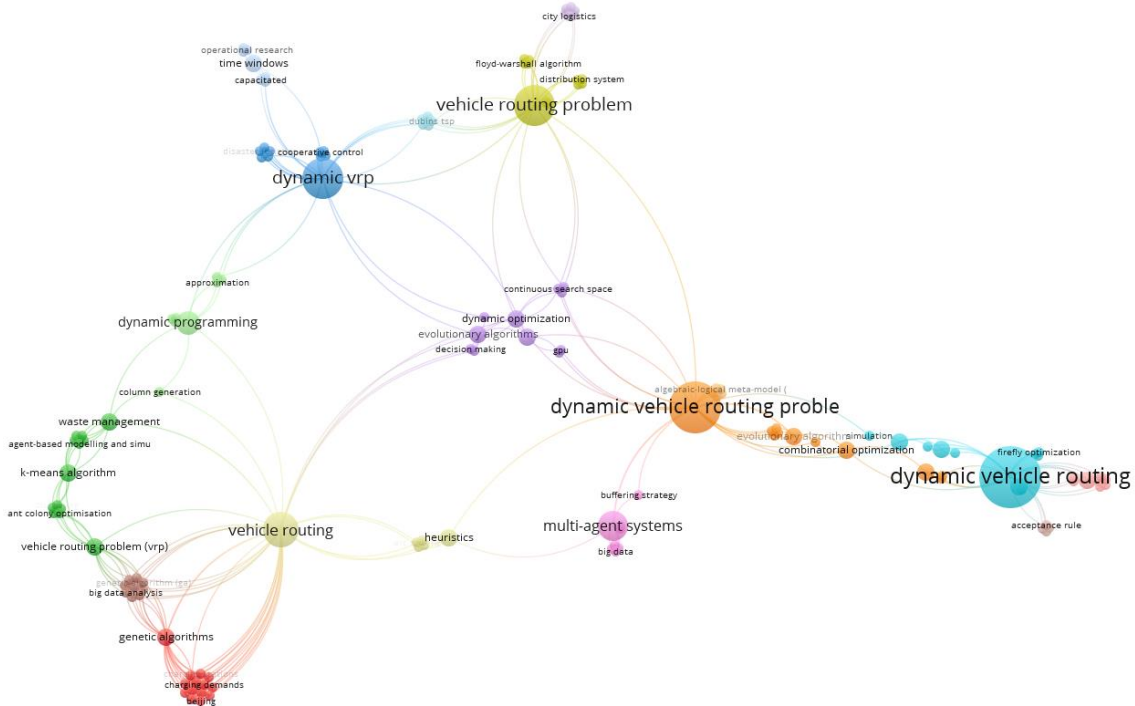


Figura 2 - Mapa das Palavras-Chave utilizadas pelo menos uma vez

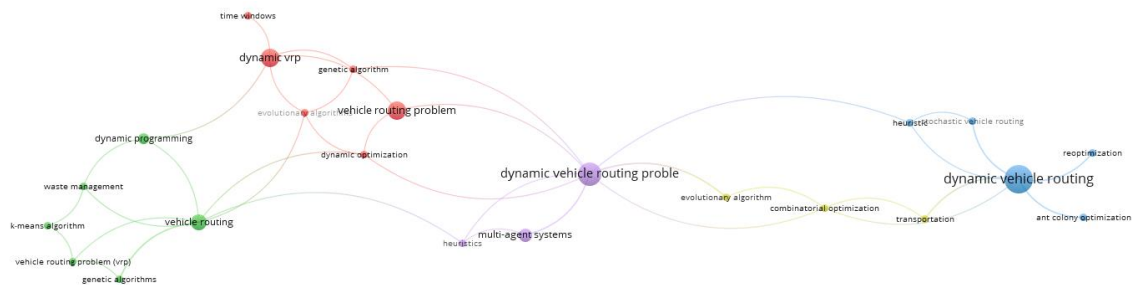


Figura 3 - Mapa das Palavras-Chave com mais relevância

Por um lado, a partir do mapa apresentado na Figura 2 verificam-se quais foram as palavras-chave utilizadas pelo menos uma vez pelos autores dos artigos em estudo, pelo que se visualiza uma quantidade razoável de termos distintos.

Por outro lado, a partir da visualização do mapa apresentado na Figura 3, podemos verificar uma melhor filtragem e uma conseqüente aproximação ao tema em estudo. É de

verificar e de mencionar a presença das palavras-chave *VRP*, *Dynamic Vehicle Routing Problem*, *Optimization* e *Transportation*, uma vez que são as que mais se aproximam e relacionam com o tema abordado neste documento.

Posteriormente, e uma vez considerada a possibilidade de se estudar uma solução para os problemas de roteamento de veículos com janelas de tempo, optou-se por realizar uma nova pesquisa, esta mais breve.

Para a mesma foram somente utilizadas as bases de dados *WoS* e *Science Direct*. As palavras-chave utilizadas nas pesquisas realizadas foram *VRPTW* e *Vehicle Routing Problem with Time Windows*. Na mesma pesquisa, a partir do *WoS* foi encontrado um conjunto de 412 documentos, dos quais, após exportação dos dados, se obteve um mapa das palavras-chave mais utilizadas pelos autores, o qual é apresentado na Figura 4.

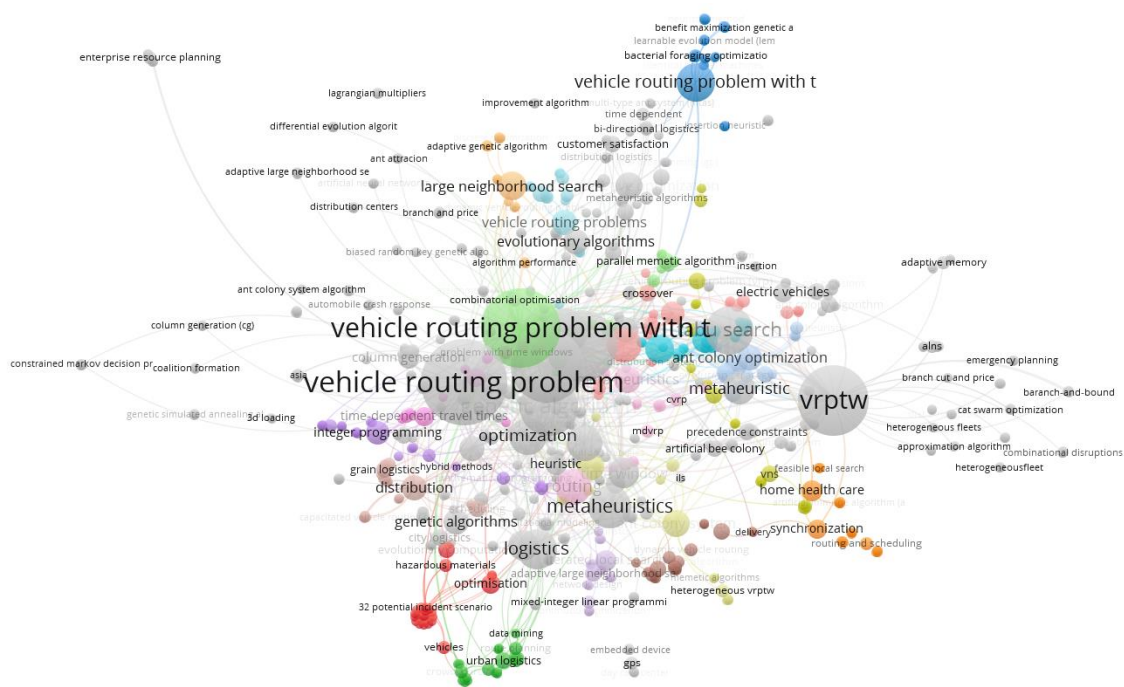


Figura 4 - Mapa das Palavras-Chave relacionadas com "VRPTW"

De modo a tornar a imagem mais clara, com o objetivo de ter uma leitura mais clara, optou-se por fazer uma filtragem utilizando apenas as palavras-chave que eram usadas pelo menos 5 vezes por parte dos autores, obtendo-se o seguinte mapa.

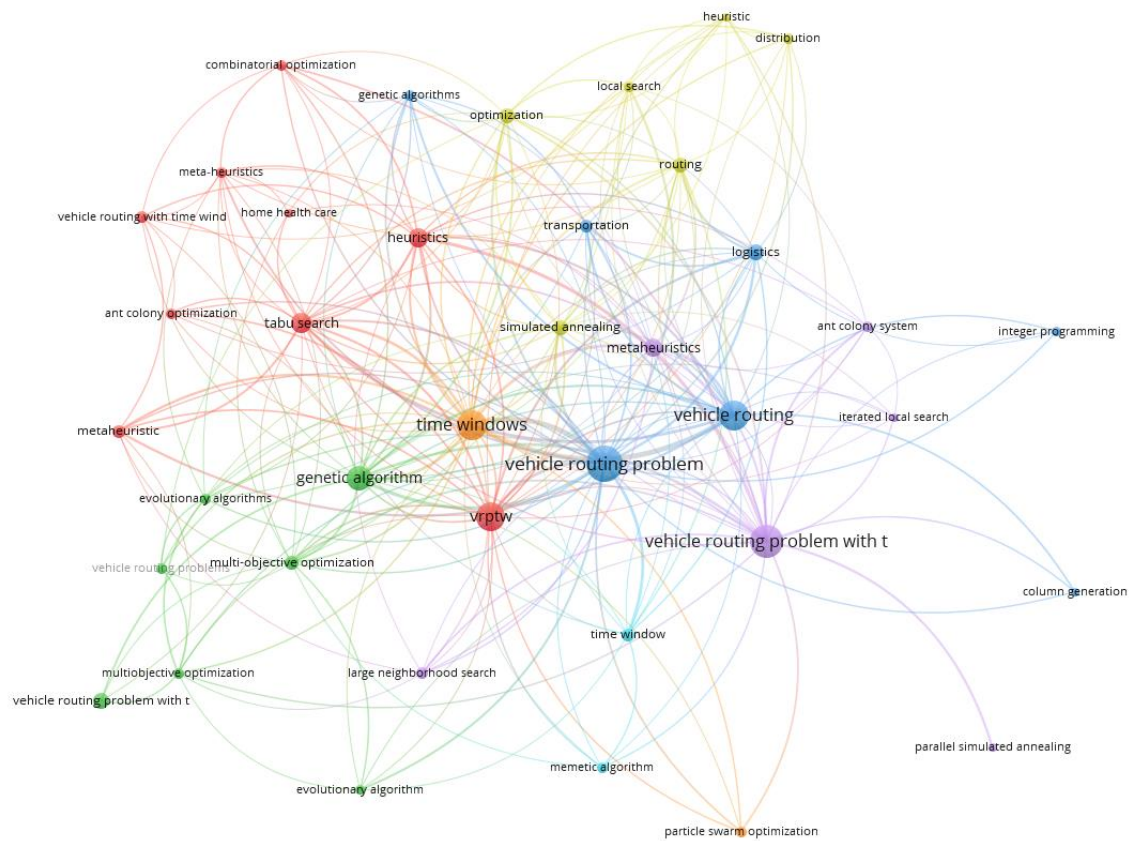


Figura 5 - Mapa Filtrado das Palavras-Chave com mais relevância

Através da visualização da Figura 5 é possível verificar que as palavras chave mais utilizadas quando abordado o tema de *VRPTW* são palavras diretamente ligadas ao mesmo, isto é, *VRPTW*, *Vehicle Routing Problem with Time Windows*, *Vehicle Routing*, *Time Windows*, e palavras que ligam o tema ao seu propósito, sendo o mesmo resolver os problemas de logística ligados ao transporte através de diferentes soluções, como, *logistics*, *transportation*, *heuristics*, *tabu search*, *genetic algorithm*, entre outras.

2.2 Fontes de publicação - jornais e revistas científicas

Na pesquisa realizada, optou-se por estudar os jornais/revistas, com um maior número de publicações nesta área. Foi também possível verificar que a maior parte dos documentos foram publicados em jornais científicos diferentes, originando assim, um elevado número de editores com, somente, um ou dois artigos publicados.

Na Figura 6 são apresentados os cinco jornais mais importantes entre a lista completa.



Figura 6 - Jornais e Revistas com maior número de publicações no tema DVRP

Este estudo constou na recolha dos valores de determinados indicadores, sendo assim recolhido o valor de *H-Index* e o quartil do respetivo editor, para uma melhor interpretação do grau de impacto e do grau de confiança do editor em questão.

O *H-Index* consiste na “medição” da produtividade e o impacto das publicações. Assim, quão mais produtivos e quão mais impactantes forem os editores, no caso em estudo, mais elevado será o seu *H-Index*, sendo esse um fator positivo.

O quartil do editor corresponde, por sua vez, à importância da editora em comparação a outras que se encontram a publicar artigos na mesma área, ou seja, corresponde ao nível que a editora se encontra quando comparada a outras idênticas. Os quartis dividem uma amostra em quatro partes iguais, isto é, cada parte fica com 25% da população total. De mencionar que o Quartil 1 corresponde ao quartil com uma melhor qualificação.

Ambos os indicadores acima mencionados foram recolhidos através das plataformas *WoS* e *SCImago Journal Rank*.

Parte dos documentos analisados foram publicados pelos jornais/revistas com um elevado valor de *H-Index* e situados no Quartil 1. No entanto foram analisados outros documentos que não se encontravam publicados em jornais/revistas, mas que revelaram ter um alto impacto na sociedade.

Relativamente ao tema de *VRPTW*, optou-se por selecionar os documentos, dos 412, que apresentavam uma maior relevância de acordo com a plataforma *WoS*, para posteriormente fazer uma análise às editoras com uma maior taxa de publicação.

Devido ao elevado número de editoras e ao elevado número de documentos, não há uma editora que tenha uma grande notoriedade, visto que o número máximo de documentos

publicado são três. A Figura 7 apresenta um mapa das revistas com um maior número de artigos publicados no tema.



Figura 7 - Jornais e Revistas com maior número de publicações no tema “VRPTW”

2.3 Abrangência da pesquisa no tempo

Apesar do surgimento do problema do caixeiro-viajante ter ocorrido no início do século XIX, este tema só começou a ser especificamente estudado por volta da segunda metade do século XX. Posteriormente, com a ocorrência da evolução tecnológica, passou a ser mais fácil estudar este problema e arranjar soluções para o mesmo, como por exemplo através de algoritmos genéticos e programação dinâmica.

Só em anos mais recentes, a partir do início do século XXI, é que se começou a abordar o tema *Dynamic Vehicle Routing Problem*. Este facto, pode ser comprovado ao analisarmos os anos de publicação dos artigos encontrados na pesquisa anteriormente realizada. Através do *WoS* é possível verificar quais os anos de publicação dos documentos, a partir do qual se obteve a distribuição presente na Figura 8.

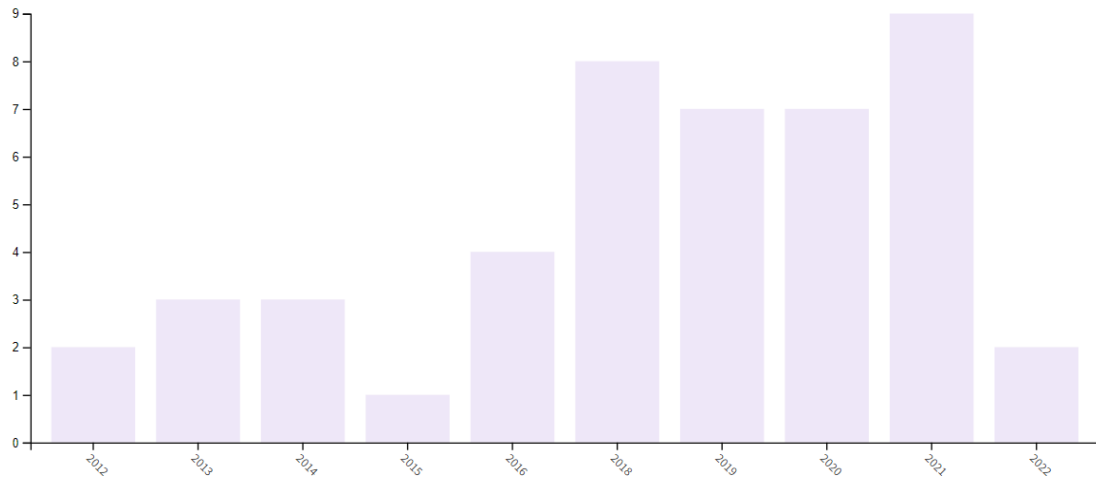


Figura 8 - Anos com maior número de publicações no tema DVRP

Com base na Figura 8 pode-se conferir que o tema abordado é um tema atual, e em crescimento. A partir dos dados obtidos pode-se provar que o ano com uma maior produtividade, foi o ano de 2021, sendo que os anos anteriores, à exceção de 2017, foram anos de constante evolução e de exploração do tema abordado neste documento.

Desta forma confirma-se que o *Dynamic Vehicle Routing Problem* é um assunto de cada vez mais relevância e de grande impacto nas empresas e no seu dia a dia.

No que toca aos documentos publicados relativos ao tema *Vehicle Routing Problem with Time Windows*, é possível verificar um maior crescimento do tema a partir do ano de 2006. A partir de 2012 esse crescimento foi mais acentuado, devido ao crescimento das empresas e à evolução da tecnologia, havendo uma maior exigência. É de notar que nos anos de 2021 e 2022 houve uma alta abordagem ao assunto, sendo anos recentes, contando com cerca de 10% do número total de documentos. O referido pode ser conferido a partir da visualização da Figura 9.

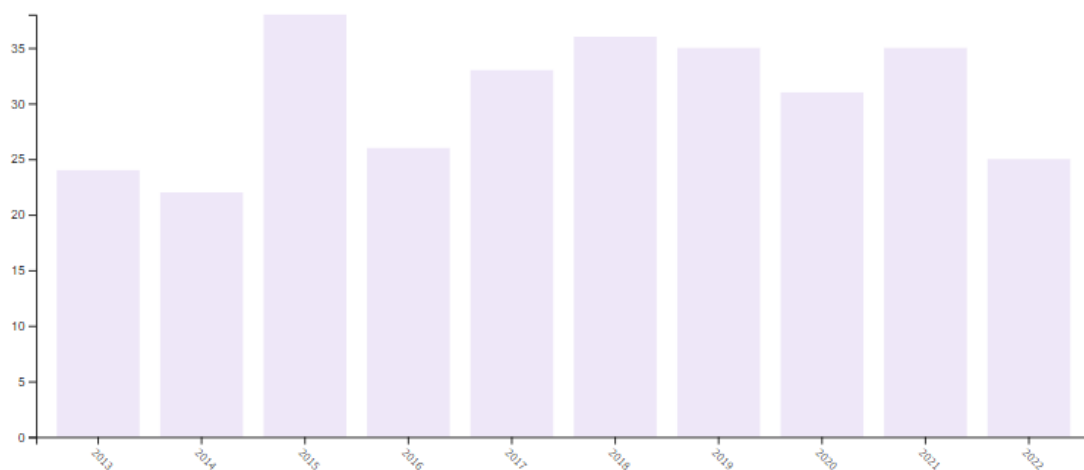


Figura 9 - Anos com maior número de publicações no tema "VRPTW"

2.4 Áreas de Pesquisas

Os temas abordados neste trabalho de pesquisa são abrangentes a diferentes áreas como Computação, Gestão, Engenharia, Transportes, Matemática, Economia, entre outras, uma vez que se trata de algo indispensável e mensurável às empresas, visto que estas procuram um aprimoramento contínuo, em busca da melhor solução para funcionamento da mesma. Apesar do grande alcance do tema *DVRP*, este destaca-se majoritariamente em três áreas específicas, tal como se pode conferir através da Figura 10, sendo as mesmas: em primeiro lugar e com um grande destaque, a ciência computacional, e posteriormente a ciência da gestão da investigação operacional e a engenharia.

A ciência computacional é essencial, uma vez que, atualmente, as soluções encontradas para os problemas de otimização no que toca a transportes são processadas a partir de um algoritmo computadorizado, de modo que a solução seja obtida o mais rapidamente possível. É ainda de mencionar a importância da área relativa aos transportes, uma vez que é o principal foco do tema deste artigo.

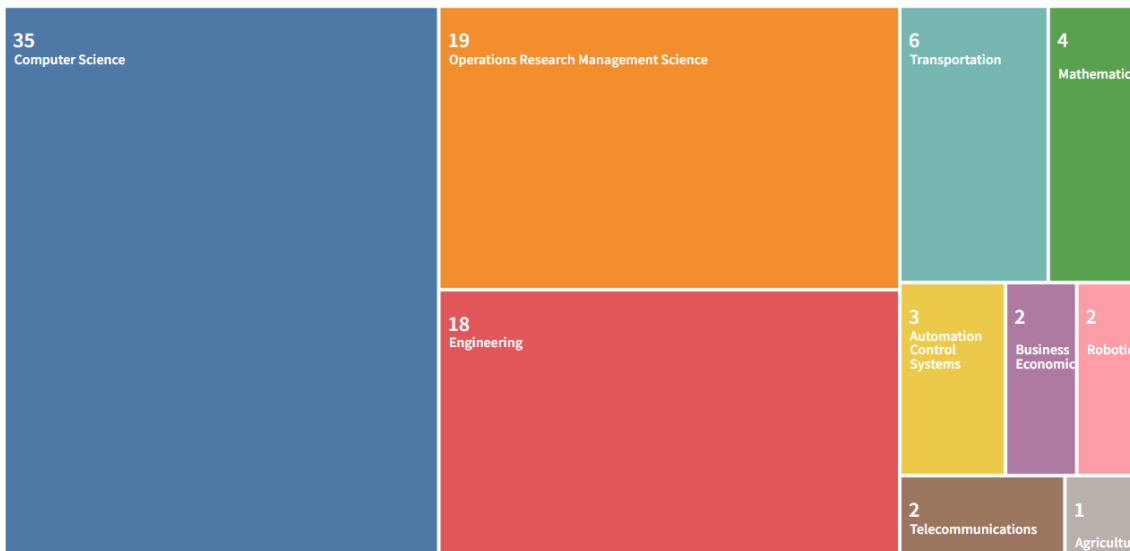


Figura 10 - Áreas de pesquisa que mais abordam o tema DVRP

No que diz respeito ao VRPTW, e de forma semelhante ao tema anteriormente mencionado, é abordado, com grande frequência, em áreas ligadas a gestão, computação, engenharia e transporte.

Evidencia-se, tal como se pode observar a partir da Figura 11, a publicação destes artigos na área de pesquisa associada à gestão, em áreas de ciência computacional, engenharia elétrica e industrial e ainda na ciência associada aos transportes.

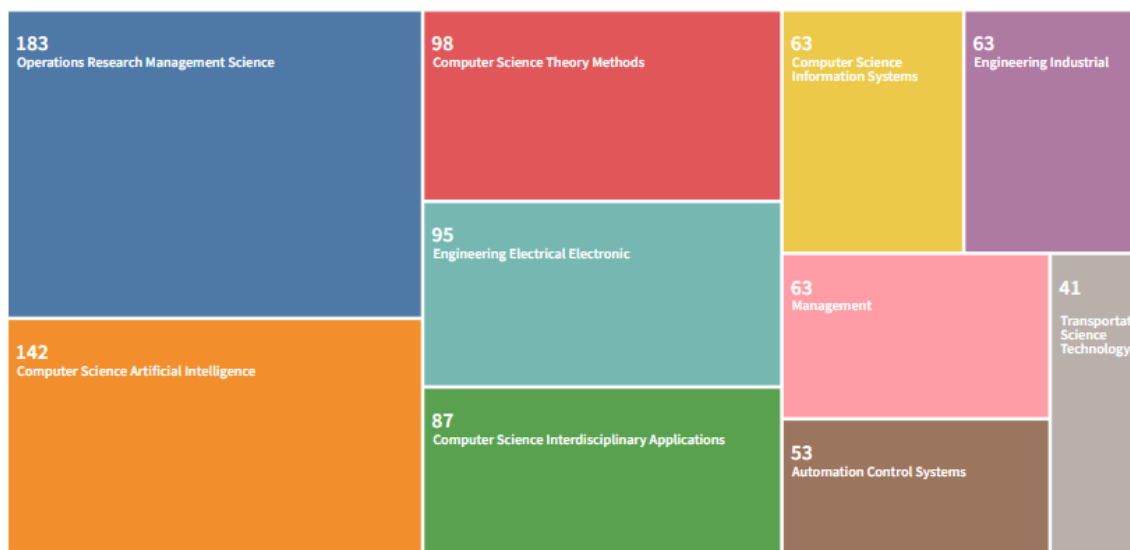


Figura 11 - Áreas de pesquisa que mais abordam o tema VRPTW

2.5 Contributos de publicação na área por país

A partir da lista de artigos, com a ajuda da ferramenta proporcionada pela WoS foi possível criar um gráfico, apresentado na Figura 12, que ajuda a perceber a distribuição

geográfica da abordagem do tema *Dynamic Vehicle Routing Problem* e de onde é plausível concluir alguns factos.

A análise realizada compreende-se entre os anos de 2007 e 2021, tal como apresentado no subcapítulo 2.3, Figura 8.

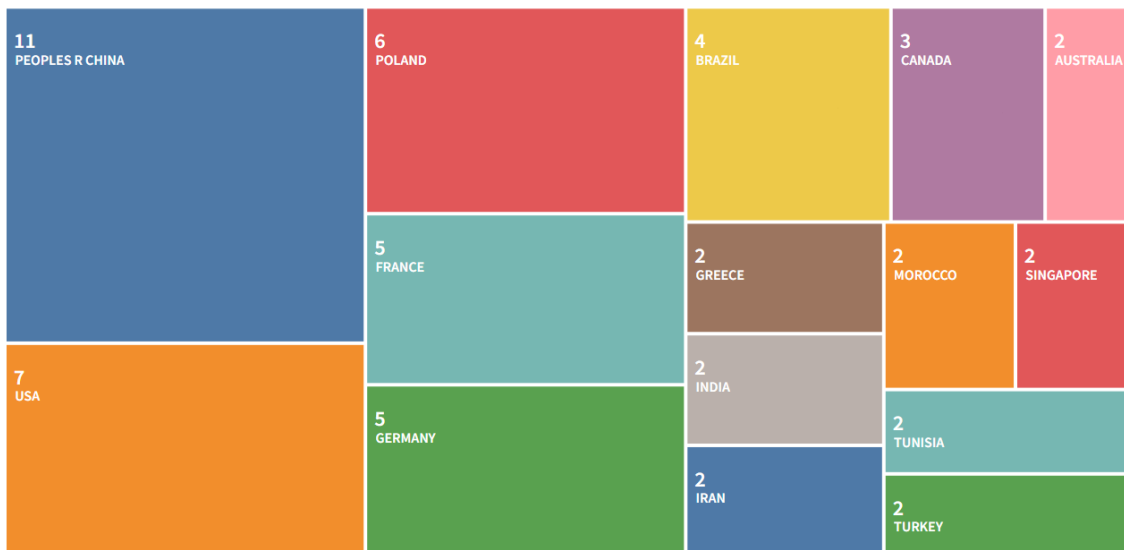


Figura 12 - Países mais interpeladores do tema *Dynamic Vehicle Routing Problem*

Através da interpretação da mesma conclui-se que os países que mais exploram e investigam o tema em causa, são países com uma área territorial bastante elevada. Isto deve-se à necessidade e problemas que as empresas que se encontram nestes locais enfrentam no que toca a distribuição, uma vez que têm de cobrir uma grande área e o seu objetivo é diminuir ao máximo os custos relacionados com distribuição, procurando, ao mesmo tempo, satisfazer o maior número de clientes possível.

Ao analisarmos os países que se encontram na lista, pode-se também confirmar que os mesmos são grandes distribuidores ou produtores a nível mundial, não tendo, desta forma, somente de se preocupar com a distribuição nacional, mas também internacional. O estudo do tema em questão ajuda, então, a diminuir os custos, como também ajuda no planeamento do envio de todas as mercadorias.

O mesmo foi possível concluir a partir da análise da distribuição geográfica das publicações associadas ao *Vehicle Routing Problems with Time Windows*. Apesar do número de documentos ser extremamente elevado, verificou-se que havia uma grande interpelação do assunto em países com uma área territorial extremamente elevada e em países com uma grande distribuição de produto para o exterior. Estes factos podem ser confirmados a partir da visualização da Figura 13. O espaço temporal desta análise é o apresentado no subcapítulo 2.3, Figura 9, ou seja, entre 2006 e 2021.

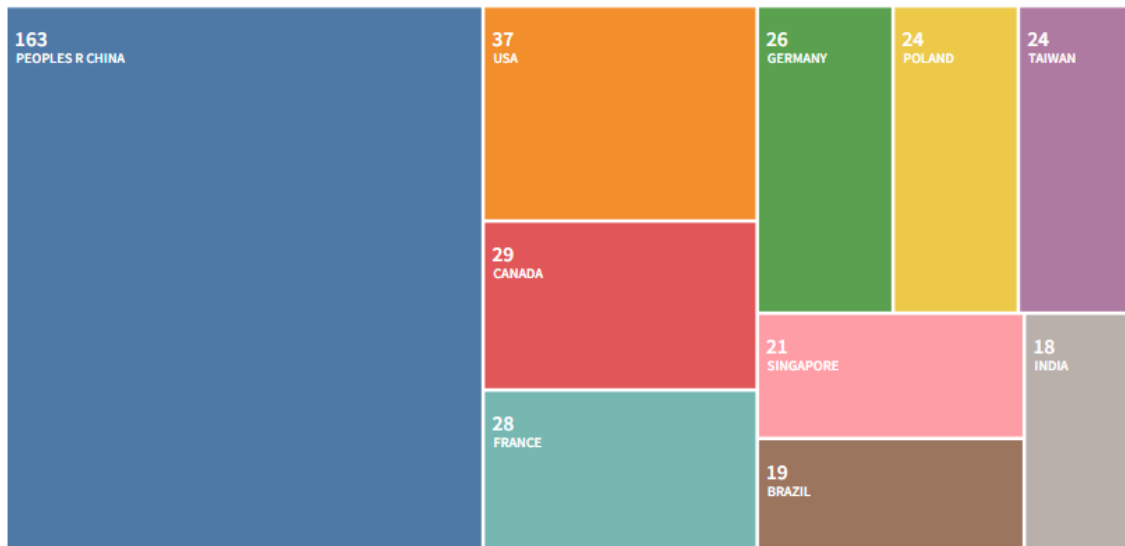


Figura 13 - Países mais interpeladores do tema *Vehicle Routing Problem with Time Windows*

2.6 Documentos Analisados

Dos documentos acima mencionados, foram selecionados os que revelaram ter um maior grau de importância, os quais foram analisados. Foi tido em consideração o ano de publicação dos documentos, havendo documentos mais antigos e documentos mais recentes. As referências que foram feitas aos documentos também foram consideradas, sendo que os documentos com um elevado número de citações têm, normalmente, um maior impacto na área à qual estão relacionados. Parte dos documentos foram excluídos uma vez que abordavam o mesmo tema, apesar de não fazerem uma análise tão profunda ao mesmo.

Tendo em conta que este artigo se dedica à abordagem dos subtemas *Dynamic Vehicle Routing Problem* e *Vehicle Routing Problem with Time Windows*, primeiramente será abordado o tema *Vehicle Routing Problem*, uma vez que este é mais abrangente e originador dos conceitos desenvolvidos neste documento.

O primeiro subtema interpelado neste artigo, *Dynamic Vehicle Routing Problem* (Problema de Roteamento Dinâmico nos Veículos) tem recebido mais atenção ao longo dos anos, devido à globalização e à consequente necessidade de enviar produtos para diferentes destinos. Devido à evolução e à exigência existente nos dias de hoje, é necessário assegurar que o transporte é feito de modo a cumprir com todos os prazos definidos, minimizando, ao mesmo tempo, o custo associado à realização do transporte. Desta forma é definida uma rota inicial ideal para a entrega do produto. Pelo facto de poderem surgirem outros pedidos de entrega ou até mesmo de cancelamento de outros, é

cada vez mais necessário ser possível adaptar essa rota inicial de modo a continuar a minimizar os custos associados ao deslocamento, cumprindo com todos os requisitos. Tudo o que foi mencionado é possível devido ao avanço nas tecnologias de comunicação e de informação, passando a haver a possibilidade da informação ser obtida em tempo real e, com a tecnologia adequada, arranjar resposta em tempo real ao problema/mudança identificado [2].

Posteriormente, e devido à decisão de acrescentar a abordagem e análise ao tema *Vehicle Routing Problem with Time Windows*, foram selecionados mais documentos. Os mesmos revelaram ser os mais relevantes de acordo com a plataforma *WoS*, tendo um alto número de citações e um maior impacto.

À semelhança do subtema anteriormente falado, o *VRPTW* tem recebido mais atenção ao longo dos anos, tendo-se manifestado mais interesse pelo mesmo nas últimas duas décadas. Isto deve-se, em símile ao *DVRP*, à evolução e à necessidade das empresas responderem à mesma.

O principal objetivo neste tipo de problemas é minimizar o custo dos transportes associados às entregas, sendo necessário cumprir com as janelas de tempo impostas pelos clientes.

2.6.1 Vehicle Routing Problem

Vehicle Routing Problem surgiu em 1959 como um problema matemático para a gestão de transportes, introduzido por Dantzig e Ramser [3], e consistia em organizar a rota de camiões transportadores de gasolina entre o terminal e as várias estações alimentadas pelo mesmo[2][4]. Este conceito surgiu da generalização do conceito do *Traveling Salesman Problem (TSP)*. Este último problema é caracterizado pela existência de vértices (denominados de *clientes*), pelos quais deve passar um veículo, sendo que o mesmo deve partir de um ponto específico denominado de depósito, retornando, no final, a este mesmo ponto. O *VRP* consiste em encontrar conjuntos de rotas para K veículos idênticos, que comecem a sua rota no depósito de modo a visitar todos os vértices exatamente uma vez, sendo o objetivo minimizar o custo total das viagens realizadas [5].

Sob as condições de restrição deve ser encontrada a rota ótima de entrega com partida em um ou mais pontos específicos, de modo a fazer a entrega em vários clientes, localizados em diferentes pontos [2].

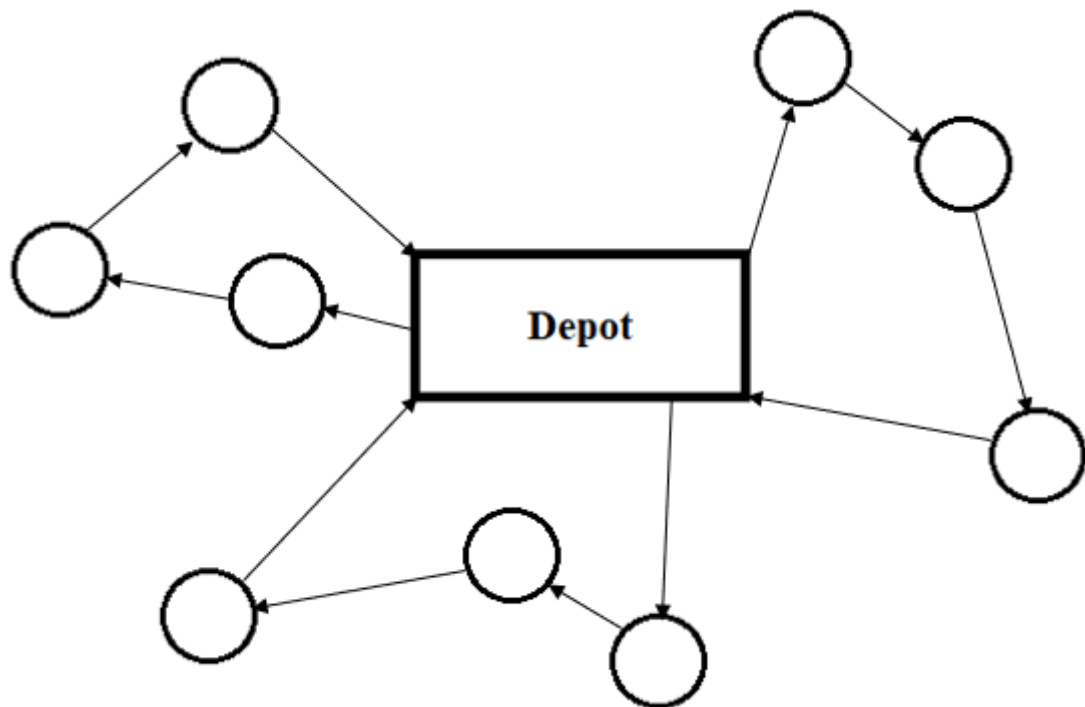


Figura 14 - Exemplo de um diagrama Vehicle Routing Problem

Na Figura 14 é possível observar um exemplo de um diagrama VRP, onde se encontram representados os vários pontos envolventes neste mesmo problema.

Os fatores que podem integrar um VRP são, maioritariamente, um ou mais dos pontos apresentados de seguida:

1. Rota: é representada pelas setas apresentadas na Figura 14, iniciando-se sempre no *depósito*, passando pelos devidos clientes tendo em conta um trajeto específico e retornando, finalmente, ao depósito;
2. Cliente: encontram-se representados pelos círculos e é o objeto de serviço;
3. Veículo: é responsável pela entrega das encomendas ou produto ao cliente;
4. Depósito: ponto inicial e final da rota de cada um dos veículos;
5. Requisitos de arranjo de transporte: as rotas realizadas pelos diferentes veículos dependem do tipo de encomenda ou produto a ser entregue, do nível da qualidade de serviço e das características apresentadas pelos clientes e pelos veículos de transporte;
6. Objetivos: estes dependem do pretendido por cada uma das empresas, contudo, o mais evidente e comum é a minimização dos custos relacionados com o transporte das mercadorias e a consequente mobilização dos veículos para realização da mesma tarefa [5].

Diferentes objetivos serão abordados uma vez expostos os temas *Dynamic Vehicle Routing Problem* e *Vehicle Routing Problem with Time Windows*.

2.6.1.1 Classificação de VRP

Ao longo do tempo e devido à evolução, foram surgindo novas vertentes ligadas ao *VRP*, sendo estas alvo de estudo académico e de aplicações práticas. Alguns exemplos destas extensões são:

- *Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP*;
- *Vehicle Routing Problem with Time Window, VRPTW*;
- *Split Delivery Vehicle Routing Problem, SDVRP*;
- *Dynamic Vehicle Routing Problem, DVRP* [5] [7] .

Apesar de haver uma maior quantidade de vertentes, as mencionadas acima revelam um maior interesse, uma vez que são abordadas num número mais elevado de documentos. Das mencionadas, e tal como referido anteriormente, será abordada a vertente dinâmica do *VRP* e a vertente exploradora de janelas de tempo, uma vez que a mesma é usada na proposta de resolução de um problema, posteriormente apresentada.

De acordo com os autores do documento [8], a classificação dos *VRP* pode-se encontrar dividida em quatro categorias:

- *VRP* estático e determinístico: toda a informação do problema é conhecida no início e não é alterada durante a realização da rota otimizada definida;
- *VRP* estático e estocástico: a informação inicial é parcialmente conhecida, sendo representadas por parâmetros aleatórios. Os verdadeiros parâmetros só serão conhecidos durante a execução da rota otimizada. Esta é predefinida no início da viagem, no entanto, são aceites alterações mínimas no decorrer da entrega;
- *VRP* dinâmico e determinístico: a informação inicial é parcialmente ou completamente desconhecida. Esta só é trespassada durante o dimensionamento ou execução das rotas. Nenhum dos componentes do problema é representado com variáveis aleatórias;
- *VRP* dinâmico e estocástico: de forma idêntica ao *VRP* anteriormente descrito, a informação inicial é também parcialmente ou completamente desconhecida, sendo só revelada durante a execução ou dimensionamento das rotas. No entanto, existe pelo menos um componente que é representado a partir de uma variável aleatória.

No que toca a elementos dinâmicos, maioritariamente manifestados na vertente *DVRP*, são maioritariamente elementos relacionados com o surgimento de clientes dinâmicos, tempos de viagem dinâmicos, problemas de funcionamento nos veículos, tempo de serviço e disponibilidade dos veículos. Todos estes elementos obrigam a um replaneamento das rotas calculadas [9].

Já nos elementos de natureza estocástica, os principais elementos de influência são a localização dos clientes, o tamanho da encomenda, o tempo de viagem, os pedidos dos clientes, o tempo de serviço e a disponibilidade dos veículos [5][6].

2.6.1.2 Métodos de Resolução de VRP

Tendo em conta os documentos publicados até os dias de hoje, os problemas *VRP* podem ter variados métodos de resolução, divididos entre algoritmos exatos e algoritmos heurísticos.

Os algoritmos exatos utilizados podem ser de quatro tipos: *branch and bound approach*, *cutting planes approach*, *network flow approach* e *dynamic programming approach*.

Os algoritmos heurísticos utilizados para a resolução deste tipo de problemas podem ser divididos em três grupos: heurísticas de construção, heurísticas de melhoria e meta heurísticas.

Nas heurísticas de construção é construída uma primeira solução para o problema apesar da mesma poder não ser uma boa solução para este. Nestas heurísticas são incluídos métodos como: conceitos de poupança [10], o mecanismo de varredura [11], métodos cluster primeiro rota segundo [12] e rota primeiro cluster segundo [13-14].

As heurísticas de melhoria partem de uma solução admissível, alterando-a e procurando iterativamente soluções melhores. Estas heurísticas incluem resoluções de problema para rotas individuais (*r-opt exchanges*, *Or-opt exchanges*, *2-opt* exchanges*, *4-opt* exchanges* e o mecanismo de *unstringing and stringing*), duas rotas (*chain exchanges*, *the λ -interchange mechanisms*, *the string cross*, *string exchange and string relocation schemes of van Breedam*) ou mesmo múltiplas rotas (*cyclic exchanges*, *edge exchange schemes*, *ejection chains* e vizinhanças muito grandes onde uma sequência de movimentos é determinada através da solução de um problema otimização de fluxo de rede auxiliar) [14].

Finalmente, apresentam-se, como exemplo, seis tipos de meta heurísticas, sendo estes: *Simulated Annealing (SA)*, *Deterministic Annealing (DA)*, *Tabu Search (TS)*, *Genetic Algorithms (GA)*, *Ant Systems (AS)* e *Neural Networks (NN)* [15].

2.6.2 Dynamic Vehicle Routing Problem

Tal como mencionado no subcapítulo 2.6, o interesse pelo tema *Dynamic Vehicle Routing Problem* tem vindo a aumentar ao longo dos anos. Assim como evidenciado no documento [9], a procura e abordagem deste tema começou a aumentar, maioritariamente a partir dos anos 2000, sendo que se destacou o período concentrado entre 2006 e 2010, uma vez que houve um maior número de referência a documentos relacionados com esta área [9]. A partir da data de publicação destes documentos (2015) verificou-se, novamente um aumento no número de publicações, tal como se pode verificar no subcapítulo 2.3.

No entanto, a primeira abordagem próxima ao tema será datada de 1980, por parte de Harilaos N. Psaraftis [16] onde o autor aborda o problema do caixeiro-viajante. Primeiramente toma uma abordagem estática ao problema, tal como o mesmo já era conhecido. Posteriormente fala na possibilidade de uma abordagem dinâmica, descartando o facto de todos os clientes terem de ser conhecidos no início da viagem e colocando a hipótese de surgirem novos clientes ao longo da rota ótima anteriormente definida. Assim, seria feito um recálculo da rota anteriormente ótima, de modo a encontrar uma nova, num período considerável. Na proposta sugerida o sistema deveria ser o suficientemente inteligente para reconsiderar decisões ou rotas anteriormente calculadas, caso as mesmas fossem mais benéficas. Os problemas levantados pelo investigador seriam relacionados com a possibilidade de um dos clientes, devido à sua posição geográfica, poder ser, continuamente, designado como último cliente a ser visitado [16].

O conceito em questão é uma vertente do *VRP* que se dá quando algumas das ordens são conhecidas adiantadamente, antes do início do dia de trabalho, mas ao longo do mesmo, chegam novas ordens, fazendo com que tenha de existir uma atualização no sistema, de modo a incluir as novas entregas a realizar [17]. O objetivo é encontrar uma rota otimizada, enquanto se dá a simulação da rota anteriormente calculada. Alguns exemplos reais deste problema são: empresas de distribuição, empresas de correio, transporte de pessoas e serviços de emergências médicas [7].

As principais características deste tipo de problemas são:

- Qualquer tipo de informação dinâmica pode ser recebido em tempo real;
- Todo o tipo de informação é aleatório e incerto;
- As rotas dos veículos têm de ser dinamicamente atualizadas;

- Ter uma resposta rápida a informação dinâmica [5].

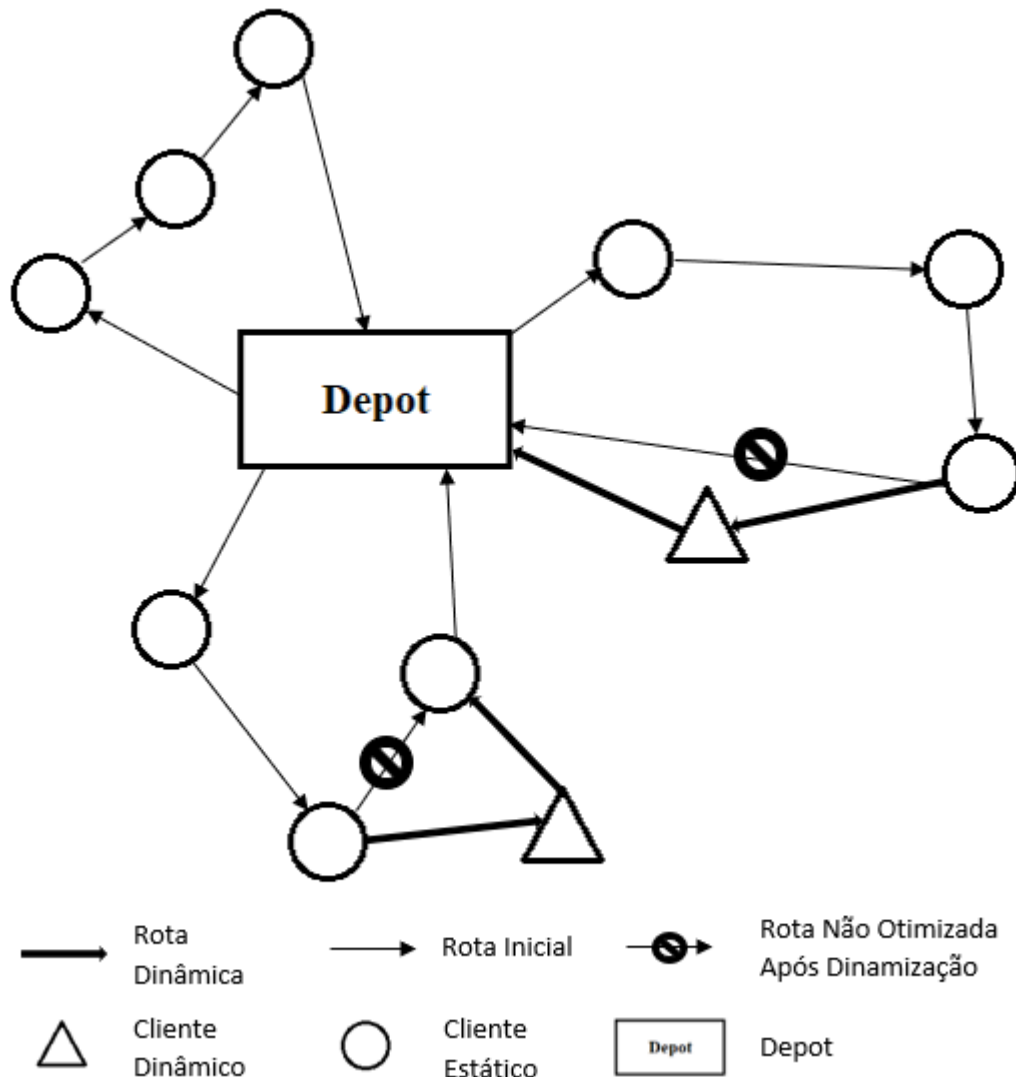


Figura 15 - Exemplo de um diagrama Dynamic Vehicle Routing Problem

Na Figura 15 é possível observar um problema de roteamento dinâmico, onde inicialmente, foi planeada uma rota ótima. Com o passar do tempo, e o eventual surgimento de dois clientes dinâmicos, ou seja, que só foram identificados enquanto a distribuição era realizada, foi necessária uma alteração de modo a incluir os mesmos. Desta forma foi feito um recálculo da rota ótima.

Com a evolução tecnológica foram surgindo tecnologias avançadas no que toca a atualização da localização e do estado das vias que podem fazer parte de uma rota ótima, ajudando assim o processo de dinamismo a aplicar. Alguns dos exemplos destas tecnologias são: *Electronic Data Interchange (EDI)*, *Global Positioning System (GPS)*, *Geographic Information System (GIS)*, *Intelligent Vehicle Highway Systems (IVHS)*,

Cloud Computing, *Internet of Things (IoT)*, entre outros sistemas de tráfego de comunicação e de informação [9]. A interoperabilidade entre sistemas é conseguida com interfaces de programação, *Application Programming Interface (APIs)*.

2.6.2.1 *Classificação dos DVRP*

O conceito de *DVRP* pode ser ainda dividido em várias classificações, tendo em conta o tipo de problema que é abordado pelo mesmo.

Primeiramente, existe o roteamento de procura dinâmica, *Dynamic Demand based VRP (DDVRP)* onde as procuras são dinâmicas, podendo isto incluir novos pedidos de entrega, cancelamento de pedidos anteriormente previstos, alteração do local de entrega da encomenda, alteração do pedido ou do horário de entrega, resultando assim num recálculo da rota otimizada de acordo com a nova informação da procura (dinâmica) [5].

Existe também a vertente de *Real-time traffic information based VRP (RTVRP)*, onde as atualizações do trânsito são dadas em tempo real. A congestão do tráfego é devida a variadas condições, afetando a velocidade do trânsito e, conseqüentemente, o tempo de viagem, sendo estas alterações dinâmicas. De modo a contornar estes atrasos, as rotas dos veículos devem ser constantemente atualizadas [5].

Finalmente, existe a combinação das duas vertentes anteriormente faladas, que procura combinar ambos os fatores dinâmicos, isto é, *Dynamic Demand & Real Time Traffic Information Based VRP (DDVRP)*, que inclui não só as alterações das procuras dos clientes, mas também as atualizações da rede de trânsito [5].

2.6.2.2 *Nível de dinamismo*

De modo a ser possível comparar métodos de resolução dos problemas deste tipo é necessário que haja um termo de distinção entre os variados problemas existentes no que toca à dificuldade de adaptação ao problema. Para tal foi criado o conceito de nível de dinamismo.

Diferentes problemas têm níveis de dinamismo diferentes, sendo os mesmos caracterizados em termos de frequência de alterações (com que frequência é que surgem novos pedidos ou alterações nos pedidos anteriores) e urgência nos pedidos (tempo passado entre o surgimento de um novo pedido e o tempo esperado de resposta ao mesmo).

Tendo em consideração os aspetos anteriormente mencionados surgiram diferentes métricas para a medição do nível de dinamismo.

No documento [8] são dadas três diferentes métricas para realizar a medição do nível de dinamismo do problema.

A primeira métrica é definida como a razão entre o número de pedidos dinâmicos (n_d) e o número total de pedidos (n_{total}) [3-4].

$$\delta = \frac{n_d}{n_{total}} \quad (1)$$

Considerando que o tempo de divulgação dos pedidos é também importante, surgiu o conceito de nível efetivo de dinamismo, podendo este ser interpretado como o tempo médio normalizado de divulgação dos pedidos. Temos então,

$$\delta^e = \frac{1}{n_{total}} \sum_{i \in R} \frac{t_i}{T} \quad (2)$$

onde T é o tempo decorrido, R é o conjunto de solicitações e t_i o tempo de divulgação do pedido [8].

Por último surgiu uma variante do cálculo do nível de dinamismo tendo em consideração o nível de urgência das solicitações, representada pela fórmula (3). A mesma define o tempo de reação como a diferença entre o tempo de divulgação t_i e o fim da janela de tempo correspondente l_i , sendo que, um tempo de reação mais elevado significa maior flexibilidade para inserir pedidos em rotas existentes. A equação dada para cálculo do nível de dinamismo é [8]:

$$\delta_{TW}^e = \frac{1}{n_{total}} \sum_{i \in R} \left(1 - \frac{l_i - t_i}{T} \right) \quad (3).$$

O nível de dinamismo, independentemente do método de avaliação utilizado, varia entre 0 e 1 e quanto mais elevado for o seu valor, maior o grau de dinamismo da solução aplicada ao problema.

É de mencionar que apesar dos métodos acima apresentados serem bons avaliadores do nível de dinamismo, os mesmos não têm em consideração todas as variantes que podem influenciar o desempenho das soluções apresentadas, como por exemplo, a localização geográfica dos demais pedidos e também o tempo de deslocação entre os mesmos.

2.6.2.3 Elementos Limitantes

Nos *DVRP*, de modo a conseguir cumprir com as alterações dinâmicas que vão surgindo ao longo do tempo, as empresas devem ter capacidade de fazer as alterações necessárias

às rotas anteriormente definidas. Por vezes, essas alterações não são possíveis devido a limitações da própria rede ou limitações impostas pelos clientes. Essas restrições estão muitas vezes associadas a: tamanho da frota, delimitações de tempo e capacidade de transporte dos veículos.

No que toca a tamanho da frota, ou por outras palavras, o número de veículos disponíveis, existem documentos que falam em transporte por parte de um veículo sozinho, múltiplos veículos ou veículos suficientes para satisfazer qualquer dinâmica que, eventualmente, possa surgir [18].

A capacidade dos veículos que realizam o transporte é também um elemento que pode delimitar os clientes que podem ser servidos, influenciando, desta forma, as entregas dinâmicas que podem ser realizadas.

Atendendo aos fatores anteriormente apontados e a todas as alterações de rotas que podem ocorrer em simultâneo, podem surgir casos em que a capacidade da rede de distribuição não é suficiente para responder a todos os pedidos, resultando assim na necessidade de recusar clientes dinâmicos que surjam ao longo da distribuição. Normalmente, esta decisão não é ideal, nem considerada, mas pode ser uma consequência natural devido às limitações apresentadas.

2.6.2.4 Soluções para DVRP e as suas Variantes

Na resolução de *DVRP*'s são usados, maioritariamente dois tipos de algoritmos, os precisos e os heurísticos.

Os algoritmos de precisão são mais utilizados na resolução de *DRVP*, tendo sido encontradas várias formas de resolução. As mesmas diferem ao longo dos documentos, tendo sido encontrados os algoritmos [5]: geração de colunas[19-20], programação dinâmica neuronal [20], programação dinâmica adaptável [21], programação dinâmica aproximada [22], programação dinâmica para trás [5].

No que se refere a variantes de *DVRP* são predominantemente utilizados algoritmos heurísticos. Dependendo do problema que se está a abordar, são utilizados diferentes algoritmos, tal como é apresentado de seguida [5]:

- *DVRP*: algoritmo genético;
- *DDVRP*: algoritmos de inserção, de busca de vizinhança grande adaptável, de pesquisa de vizinhança adaptável, de colónia de formigas, genético híbrido adaptativo de dois níveis, *Particle Swarm Optimization (PSO)*, *PSO* adaptável a diversos grupos, de construção de cruzeiro paralela, de múltiplos acontecimentos,

baseado no relaxamento de Lagrange, de otimização local memética e de *Dijkstra* hierárquico aprimorado;

- *DVRPSTW*: algoritmo de pesquisa tabu paralela;
- *DDVRP*: algoritmos de inserção e genético híbrido adaptativo de dois níveis;
- *DDVRPPD*: método de pesquisa local e algoritmo *PSO* auto organizável;
- *New order request VRP*: Sistema de colônia de formigas;
- *RTVRP*: algoritmos genéticos híbridos adaptativos de dois níveis e de colônia de formigas em cluster;
- *MDVRP*: algoritmo *PSO* de vários grupos de duas fases.

2.6.3 Vehicle Routing Problem with Time Windows

Neste subcapítulo será abordado um pouco o subtema *Vehicle Routing Problem with Time Windows*, uma vez que a solução apresentada é indicada para este tipo de problema.

Com a evolução da exigência das empresas é cada vez mais importante que os horários de entregas e de serviços realizados sejam o mais pontuais possíveis. Um atraso numa entrega pode colocar em causa um trabalho ou uma corrente deles, causando, posteriormente um atraso maior. Desta forma, procedeu-se ao estudo de problemas *VRPTW*, classificando-se estes como problemas de otimização combinatória difícil, e de que modo é que certas soluções podem influenciar os problemas neste tema encontrados. O principal objetivo do *VRPTW* consiste em projetar um conjunto ótimo de rotas de entrega ou coleta, a partir de um depósito para um certo número de cliente, tendo em conta as restrições colocadas e as janelas de tempo definidas [23].

À semelhança dos *VRP*, os *VRPTW* são problemas *NP-hard* (*nondeterministic polynomial time problem*) [24], isto significa que os problemas deste género podem ser “pelo menos tão difíceis como outros problemas *NP-hard*”, podendo ser até mais difíceis. Nos mesmos, o tempo de resolução cresce de forma não polinomial consoante o tamanho da instância.

2.6.3.1 Classificação dos *VRPTW*

Os problemas *VRPTW* podem ser divididos em dois tipos. Pode haver uma aproximação ao problema usando janelas de tempo flexíveis, onde, caso haja uma entrega feita fora da janela de tempo, isto é, mais cedo ou mais tarde do que o tempo previsto, há uma penalização, ou pode haver uma aproximação usando janelas de tempo rígidas, onde não

é permitido qualquer atraso na entrega da encomenda ou caso a mesma chegue antes do horário de entrega, terá de esperar pelo mesmo [25].

No caso das janelas de tempo serem rígidas, caso um veículo chegue ao cliente antes do tempo, o mesmo terá de aguardar até que o cliente esteja preparado para começar o serviço [26].

Normalmente, quando se fala em problemas de roteamento de transportes tendo em conta janelas de tempo (*VRPTW*), os mesmos referem-se a problemas com janelas de tempo rígidas. Caso o problema a analisar seja de janelas de tempo flexíveis pode ser utilizada a denominação *Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows (VRPSTW)* ou *Vehicle Routing Problem with Flexible Time Windows (VRPFlexTW)* [27].

Como exemplos de janelas de tempo rígidas surgem trabalhos e entregas que exigem a máxima responsabilidade. A título de exemplo tem-se: serviço de segurança da patrulha, entregas bancárias, postais e de alimentos, rota dos autocarros escolares, distribuição de jornais e ainda a recolha do lixo [25][27].

A título de exemplo de trabalhos que utilizam maioritariamente janelas de tempo flexíveis é apresentado a marcação de uma viagem [25][27].

Uma das vertentes mais explorada neste subtema é a vertente dinâmica (*DVRPTW*), onde são combinadas as janelas de tempo, com a possibilidade de surgimento de novos clientes dinâmicos, estes com janelas de tempo de entrega também, ou com o aparecimento de possíveis atrasos, desde congestionamento no trânsito, alterações na encomenda, ou outros elementos dinâmicos já mencionados no subcapítulo 2.6.2.4.

2.6.3.2 Soluções para VRPTW

Ao longo dos anos foram desenvolvidas diversas formas de resolução dos problemas de roteamento de transportes com janelas de tempo [25][28]:

- *Tabu Search Metaheuristic* [29];
- *Tabu Search + Adaptive Large Neighborhood* [30];
- *Column generation* [31];
- *Exact branch-cut-and-price algorithms* [32];
- *Iterated Tabu Search* [33];
- *Decremental State-space algorithm* [34];
- *Brand-Cut-and-price with SR3 and with generalized k-path* [35];
- *Mathematical formulations, relaxations, and exact methods* [28].

No entanto, algumas das soluções encontradas revelaram ser mais utilizadas nos dias de hoje para a resolução de problemas de *VRPTW*. Entre as mesmas destacam-se: pesquisa Tabu (TS), algoritmos genéticos (GA), algoritmos evolucionários (EA), algoritmos exatos, algoritmos de otimização por colônia de formigas (ACO) [2].

2.6.3.3 Elementos Limitantes

Para além das limitações associadas à capacidade e à quantidade dos veículos, quando se fala de entregas a clientes, a maior parte das vezes são associadas a estas, restrições no que toca a horário de entrega ou limite de prazo para entrega. Desta forma, o limite de tempo torna-se um elemento a ter em consideração. Dependendo do tipo da janela de tempo, abordado anteriormente neste documento, no subcapítulo 2.6.3.1, o fornecedor pode ser penalizado, ter de ir para o fim da fila (muitas vezes horas depois) com os custos associados (retornar para deixar carga e voltar a ir e voltar na nova janela) ou a entrega pode chegar a não ser realizada.

Por vezes, caso no projeto desenvolvido não haja rejeição de clientes e caso seja obrigatório cumprir com as janelas de tempo, surgem problemas de otimização impossíveis [9].

3 Análise do impacto das janelas temporais no TSP

De forma a desenvolver uma solução para os *VRPTW*, foi analisado um estudo realizado por Gerçek Budak e Xin Chen [36] onde se verifica qual é o impacto da aplicabilidade das janelas temporais em problemas do caixeiro-viajante (*TSP*) quer na duração do tempo da viagem, na satisfação do cliente e no tempo de solução das rotas ótimas de entrega. O estudo foi realizado tendo em conta o crescente interesse em *TSPTW* e a pressão exigida às empresas para melhorar o serviço aos clientes. O mesmo é aplicado a um conjunto de instâncias de referência e o software *General Algebraic Modeling System (GAMS)* é utilizado para resolver as instâncias e encontrar a rota ótima que minimiza a duração da viagem [36].

O problema estudado nesse documento é do tipo *TSPTW* e é modelado com um modelo de programação linear inteira. São geradas instâncias para verificar o impacto de alteração da janela temporal nos custos e nível de serviço ao cliente.

Ao longo do estudo são realizadas mudanças ao nível do tamanho das janelas de tempo, de modo a relacionar o impacto entre a diferença de custo e da satisfação dos clientes.

Ao verificar os resultados obtidos pelos autores, podem ser tiradas várias conclusões, independentemente dos métodos por eles utilizados:

- Com o aumento das janelas de tempo:
 - O tempo de viagem global diminui:
 - Menos custo de entrega;
 - A satisfação do cliente diminui;
 - Tempo para obtenção da solução diminui:
 - Diminui o custo de entrega.

De mencionar que o custo de entrega total tem tendência a diminuir com o aumento da janela de tempo. Caso a janela de tempo continue a aumentar e se torne demasiado elevada, o custo tenderá a diminuir uma vez que a solução ótima é obtida mais facilmente pela liberdade do modelo.

- Com a diminuição das janelas de tempo:
 - Aumento do custo de entrega;
 - Aumento da satisfação do cliente.

No entanto, caso a janela de tempo continue a diminuir e se torne demasiado pequena, a satisfação do cliente tenderá a diminuir. Tal acontece uma vez que nem sempre é possível

obter uma rota ótima de modo a atender todos os clientes, havendo a possibilidade de rejeitar pedidos de entregas [36].

Tendo em conta o que foi acima mencionado, as empresas que optam por adotar grandes janelas de tempo para a realização das suas entregas têm tendência a ter uma satisfação dos clientes mais baixa e um custo mais reduzido (caso as janelas sejam demasiado grandes).

Em jeito de conclusão do estudo, deveria haver opções de janelas de tempo fornecidas pela empresa das quais os clientes teriam de escolher conforme a sua necessidade, ou em caso de negociação a empresa deve tentar negociar a janela o mais alargada possível pois obtém-se maior grau de liberdade com o modelo, havendo assim um equilíbrio entre a satisfação dos clientes e o custo de entrega. Conclui-se também que há um valor de substituição entre a satisfação dos clientes e o custo das entregas.

As janelas de tempo adotadas pelas empresas não devem ser exageradamente pequenas nem exageradamente grandes, de modo que haja um equilíbrio de interesses entre fornecedor/cliente [36].

4 Modelo de Programação Linear para o VRPTW

No capítulo anterior fez-se a análise de um artigo científico onde o mesmo objetivo, análise do impacto da variação das janelas temporais foi realizado para o *TSP*. Na maior parte dos serviços de distribuição é necessário realizar mais do que uma rota ou ter mais que um veículo. Assim, e com base no trabalho desenvolvido, propusemo-nos a fazer a análise do impacto da alteração das janelas temporais num *VRP*. Começamos por desenvolver um modelo *VRPTW* de forma a ter uma solução, com seis clientes e quatro veículos, e com amplitudes de janelas temporais reduzidas. O modelo *VRPTW* foi utilizado para correr várias instâncias e apresentados os seus resultados.

Neste documento é explorada a vertente *VRPTW* em vez da *TSPTW*, uma vez que os roteamentos são feitos recorrendo a uma frota de veículos. A exploração e procura destas soluções deve-se ao facto de uma crescente exigência por parte dos clientes e da concorrência, o que obriga a maior eficiência das empresas e a ganho de vantagem competitiva e melhor serviço aos clientes.

Com base no modelo desenvolvido e apresentado a seguir, a solução para cada instância utiliza janelas de tempo rígidas, não havendo assim a possibilidade das entregas serem realizadas antes ou depois das janelas de tempo previamente definidas.

O modelo desenvolvido inclui um conjunto de dados relativos às empresas e aos clientes (conjuntos e parâmetros) e variáveis de decisão para guardar valores, que são importantes para a tomada de decisão de roteamento.

Conjuntos

C	clientes $\{2, \dots, c\}$
N	vértices na rede $\{1, 2, 3, \dots, c + 1\}$
N_0	vértices de onde o veículo pode partir $\{1, 2, 3, \dots, c\}$
N_+	vértices de onde o veículo pode chegar $\{2, 3, \dots, c + 1\}$
V	veículos $\{1, 2, 3, \dots, m\}$

Parâmetros

e_i	limite inferior da janela temporal para a entrega do cliente $i \in C$
l_i	limite superior da janela temporal para a entrega do cliente $i \in C$

t_{ij} tempo de viagem entre i e j , $i \in N_0$, $j \in N_+$

q_i procura do cliente i , $i \in C$

a_k capacidade do veículo k , $k \in V$

s_i tempo de serviço do cliente i , $i \in C$

Variáveis de decisão

x_{ij}^k variável binária, $i \in N_0$, $j \in N_+$; $x_{ij}^k = 1$ se o veículo k viaja de i para j ; caso contrário $x_{ij}^k = 0$

b_i^k variável que identifica o momento em que o serviço começa no cliente i , $i \in C$ pelo veículo k , $k \in V$

y_i^k fração da procura do cliente i , $i \in C$ entregue pelo veículo k , $k \in V$

Função objetivo

$$\min \sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_+} \sum_{k \in V} 1,25 t_{ij} \cdot x_{ij}^k \cdot 0,07 \quad (1)$$

Restrições

$$\sum_{j \in N_+} x_{0j}^k = 1 \quad \forall k \in V \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N_0} x_{ip}^k - \sum_{j \in N_+} x_{pj}^k = 0 \quad \forall p \in C, \forall k \in V \quad (3)$$

$$\sum_{k \in V} y_i^k = 1 \quad \forall i \in C \quad (4)$$

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in N_0} x_{ij}^k \geq 1 \quad \forall j \in N_+ \quad (5)$$

$$\sum_{i \in C} q_i y_i^k = a_k \quad \forall k \in V \quad (6)$$

$$y_i^k \leq \sum_{j \in N_+} x_{ij}^k \quad \forall i \in C, \forall k \in V \quad (7)$$

$$b_i^k + 10 q_i y_{ik} + t_{ij} - M(1 - x_{ij}^k) \leq b_j^k \quad \forall i \in C, \forall j \in C, \forall k \in V \quad (8)$$

$$e_i \leq b_i^k \leq l_i \quad \forall i \in C, \forall k \in V \quad (9)$$

A expressão (1) corresponde à função objetivo, na qual se pretende a minimização dos custos totais das rotas. De mencionar que o valor 1,25 é utilizado com o objetivo de realizar a conversão do tempo de viagem para a distância total e o valor 0,07 com o objetivo de converter obter o custo total, equivalendo ao custo por quilómetro.

A equação (2) garante que cada veículo sairá do armazém e chegará a um determinado cliente.

A equação (3) garante que cada veículo deixará um determinado cliente e chegará ao armazém.

Através da equação (4) assegura-se que a procura total de cada cliente será atendida.

Através da equação (5) garante-se que cada cliente será visitado pelo menos uma vez por pelo menos um veículo.

Através da equação (6) a capacidade do veículo não será excedida.

Através da equação (7) a procura de cada cliente só será atendida se um determinado veículo passar por esse cliente.

Através da equação (8) define-se um tempo mínimo para iniciar o serviço do cliente j numa determinada rota e eliminam-se subrotas.

Através da equação (9) confirma-se que todos os clientes são atendidos durante as janelas temporais.

5 Resultados Obtidos

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas diversas instâncias consideradas, realizando uma posterior análise aos resultados. Os valores utilizados ao longo das instâncias foram considerados tendo em conta a capacidade dos transportes normalmente utilizados pelas empresas para uma baixa, média e alta capacidade, atribuindo valores aceitáveis para as procuras dos clientes.

5.1 Programa Utilizado

Para o desenvolvimento da solução proposta foi utilizada a aplicação IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, versão académica. A mesma utiliza tecnologia optimizadora de decisões para otimizar as decisões em negócios, desenvolver e implementar modelos de otimização e criar aplicações que possam ajudar e melhorar os resultados obtidos. De modo a tornar o mencionado possível, a aplicação utiliza modelos matemáticos e programação de restrição. O modelo apresentado no capítulo 42 foi implementado no CPLEX e utilizado para encontrar os resultados que se apresentam de seguida.

5.2 Análise do Impacto das Janelas Temporais no VRP

De modo a ter uma melhor perceção do funcionamento do roteamento com a utilização de janelas temporais, foram construídas diversas instâncias. Com as mesmas, foram estudadas as relações existentes entre o tamanho e capacidade da frota utilizada, com a procura dos clientes e com as janelas temporais consideradas. A quantidade de clientes considerada foi fixa ao longo dos testes (10 clientes), bem como a quantidade de veículos empregues (7 veículos) e o tempo de viagem entre os clientes (apresentado na Tabela 1).

Tabela 1 - Tempo de Viagem entre Clientes

		Clientes										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Clientes	1	0	30	20	25	20	17	26	30	50	46	32
	2	30	0	45	25	40	62	13	46	31	29	52
	3	20	45	0	70	32	52	43	30	33	20	29
	4	25	24	70	0	25	30	40	62	34	70	49
	5	20	40	32	25	0	25	54	64	43	32	31
	6	17	62	52	30	25	0	23	48	45	32	45
	7	26	13	43	40	54	23	0	61	45	32	14
	8	30	46	30	62	64	48	61	0	26	48	34
	9	50	31	33	34	43	45	45	26	0	54	24
	10	46	29	20	70	32	32	32	48	54	0	45
	11	32	52	29	49	31	45	14	34	24	45	0

De mencionar que o cliente 1, ao longo de todas as instâncias é considerado como o depósito.

Posteriormente foram retiradas algumas conclusões tendo em conta os resultados obtidos.

5.2.1 Instância 1 – Baixa Capacidade e Baixa Procura

No primeiro teste realizado, foi considerada uma frota com uma baixa capacidade de transporte (3 toneladas por veículo). De modo a ser possível e aceitável a realização dos testes, foi considerada, também, uma baixa procura por parte dos clientes. Na Tabela 2 é apresentada a mesma, variando entre 1 e 3 toneladas.

Tabela 2 - Baixa Procura dos Clientes

		Clientes									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Procura dos Clientes		3	2	1	1	2	3	2	3	3	1

Para uma melhor compreensão da variação das janelas temporais e a sua influência nos restantes fatores ponderados, foram realizados vários testes variando as mesmas. Inicialmente foram utilizadas janelas temporais de 30 minutos, aumentando as mesmas para 90, 180, 240 e 480 minutos, com início nos mesmos momentos. Estas são apresentadas nas Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7, respetivamente.

Tabela 3 - Janelas de Tempo de 30 minutos

		Clientes									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Janelas de Tempo		480	600	540	700	670	800	910	850	720	1000
		510	630	570	730	700	830	940	880	750	1030

Tabela 4 - Janelas de Tempo de 90 minutos

		Clientes									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Janelas de Tempo		480	600	540	700	670	800	910	850	720	1000
		570	690	630	790	760	890	1000	940	810	1090

Tabela 5 - Janelas de Tempo de 180 minutos

		Clientes									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Janelas de Tempo		480	600	540	700	670	800	910	850	720	1000
		660	780	720	880	850	980	1090	1030	900	1180

Tabela 6 - Janelas de Tempo de 240 minutos

		Clientes									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Janelas de Tempo		480	600	540	700	670	800	910	850	720	1000
		720	840	780	940	910	1040	1150	1090	960	1240

Tabela 7 - Janelas de tempo de 480 minutos

		Clientes									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Janelas de Tempo		480	600	540	700	670	800	910	850	720	1000
		960	1080	1020	1180	1150	1280	1390	1330	1200	1440

Para uma janela temporal de 30 minutos, foram utilizados 7 dos 7 veículos, cumprindo as seguintes rotas apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 30 minutos (Baixa Capacidade e Baixa Procura)

Veículo 1	1	2	1	-
Veículo 2	1	3	10	1
Veículo 3	1	8	11	1
Veículo 4	1	7	1	-
Veículo 5	1	9	1	-
Veículo 6	1	3	5	1
Veículo 7	1	4	6	1

Tal como se pode verificar e, devido a como o problema foi abordado, a procura de um cliente pode ser satisfeita por mais do que um dos veículos. É o que acontece no caso do cliente 3 que é satisfeito por dois dos veículos utilizados, cada um deles levando uma determinada fração da procura total, completando a mesma.

Para as restantes janelas temporais, há somente alterações no que toca a rotas realizadas pelos veículos, sendo as mesmas semelhantes às apresentadas para uma janela temporal de 30 minutos. Apesar destas alterações não há qualquer alteração nos custos relativos ao transporte das mercadorias. Isto deve-se ao facto dos veículos terem uma capacidade relativamente próxima à procura dos clientes e haver uma consequente necessidade de serem utilizados todos os veículos. Na instância estudada a distância percorrida é de 672,5 quilómetros, o que equivale a um custo de aproximadamente 48,08 €.

5.2.2 Instância 2 – Capacidade Média e Procura Baixa

Para o estudo desta instância foram utilizadas as janelas temporais apresentadas no subcapítulo 5.2.1, no entanto aumentou-se a capacidade da frota, passando-se a utilizar veículos capazes de transportar 11 toneladas, em vez de 3 toneladas.

A procura considerada continuou a ser a mesma da instância 1, mais concretamente, a presente na Tabela 2.

Tendo o mencionado em conta, apresenta-se, de seguida, a Tabela 9 que contém as trajetórias a realizar por cada veículo para janelas temporais de 30 minutos.

Tabela 9 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 30 minutos (Capacidade Média e Baixa Procura)

Veículo 1	-	-	-	-	-	-
Veículo 2	-	-	-	-	-	-
Veículo 3	1	3	10	7	11	1
Veículo 4	-	-	-	-	-	-
Veículo 5	1	6	5	1	-	-
Veículo 6	-	-	-	-	-	-
Veículo 7	1	2	4	9	8	1

Tal como se pode verificar, nem todos os veículos foram utilizados, uma vez que a capacidade dos mesmos era relativamente mais elevada do que a procura de cada cliente. No caso apresentado, a procura de cada cliente é satisfeita por um único veículo. Assim, obteve-se uma distância total percorrida de 405 quilómetros e um custo associado de 28,35€.

Procedeu-se, de seguida, ao aumento das janelas temporais, passando para as de 90 minutos. Na Tabela 10, pode-se confirmar as rotas realizadas por cada um dos veículos.

Tabela 10 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 90 minutos (Capacidade Média e Baixa Procura)

Veículo 1	-	-	-	-	-	-
Veículo 2	1	3	10	5	1	-
Veículo 3	-	-	-	-	-	-
Veículo 4	-	-	-	-	-	-
Veículo 5	1	6	7	11	1	-
Veículo 6	1	2	4	9	8	1
Veículo 7	-	-	-	-	-	-

Ao comparar as trajetórias apresentadas para janelas de tempo de 30 minutos e 90 minutos, é de notar uma alteração nas rotas, apesar de ser utilizado o mesmo número de veículos. Com a mesma alteração, houve uma diminuição da distância percorrida, passando a mesma a ser 402,5 quilómetros, e uma consequente diminuição do custo total, sendo o mesmo 28,18€.

Passando as janelas de tempo a ter uma variação de 180 minutos, deu-se uma nova alteração das rotas, tal como se pode verificar através da visualização da Tabela 11.

Tabela 11 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 180 minutos (Capacidade Média e Baixa Procura)

Veículo 1	1	6	1	-	-	-	-
Veículo 2	1	4	2	7	11	1	-
Veículo 3	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 4	1	3	10	5	9	8	1
Veículo 5	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 6	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 7	-	-	-	-	-	-	-

O número de veículos continuou a ser o mesmo ao anteriormente apresentado, no entanto, a distância e o custo associados à distribuição realizada diminuíram, tendo assumido os valores de 391,25 quilómetros e 27,39 €.

De seguida, as janelas foram aumentadas para 240 minutos. As trajetórias de cada um dos veículos, correspondentes ao aumento, são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 240 minutos (Capacidade Média e Baixa Procura)

Veículo 1	1	6	7	11	9	8	1
Veículo 2	1	4	2	10	3	5	1
Veículo 3	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 4	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 5	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 6	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 7	-	-	-	-	-	-	-

Tal como é possível perceber pela análise dos dados apresentados, o número de veículos utilizados para a realização das entregas diminuiu, passando-se a usar somente dois veículos, em vez dos anteriores três veículos. Com isto, houve uma consequente alteração no que toca às rotas percorridas por cada um dos veículos. Tal, desencadeou uma nova descida na distância total percorrida, passando a mesma a 355 quilómetros e associada à mesma um custo total de 24,85€.

Finalmente foram consideradas as janelas temporais com um espaçamento de 480 minutos de forma a analisar possíveis melhoras, ou seja, verificar se seria possível uma diminuição ainda maior da distância e do custo associados às entregas. Desta forma, foram realizadas as trajetórias apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 480 minutos (Capacidade Média e Baixa Procura)

Veículo 1	1	5	4	2	10	3	1
Veículo 2	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 3	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 4	1	6	7	11	9	8	1
Veículo 5	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 6	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 7	-	-	-	-	-	-	-

Com a análise das mesmas, podemos verificar que houve uma nova alteração nas rotas dos veículos, continuando-se a utilizar dois dos mesmos. Esta mudança provocou uma nova diminuição na distância total percorrida, chegando a 340 quilómetros, e uma diminuição no custo total, atingindo um valor de 23,80 €. Foi assim alcançado o valor mínimo desta instância.

5.2.3 Instância 3 – Capacidade Média e Procura Média

Para a instância em análise foram consideradas procuras médias, isto é, compreendidas entre os valores de 4 e 11 toneladas, podendo, desta forma, uma procura de um cliente ser igual ou relativamente próxima à capacidade de um dos veículos utilizados, uma vez que

se mantêm as capacidades da instância 2. Na Tabela 14, são apresentados os valores das procuras, que são utilizados nesta instância.

Tabela 14 - Procura Média dos Clientes

	Clientes									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Procura dos Clientes	4	6	11	10	5	7	8	5	9	4

Tal como nas instâncias anteriormente estudadas, as janelas temporais utilizadas na presente, foram de 30, 90, 180, 240 e 480 minutos, tais como as apresentadas nas Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7, respetivamente.

Inicialmente, e repetindo o processo anteriormente descrito, começaram-se a realizar os testes com janelas temporais de 30 minutos. A distribuição das encomendas foi realizada por todos os veículos, cada um cumprindo a sua rota. As mesmas podem ser consultadas a partir da Tabela 15.

Tabela 15 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 30 minutos (Capacidade Média e Procura Média)

Veículo 1	1	6	1	-	-
Veículo 2	1	3	10	1	-
Veículo 3	1	2	7	1	-
Veículo 4	1	4	1	-	-
Veículo 5	1	3	8	1	-
Veículo 6	1	3	9	11	1
Veículo 7	1	5	1	-	-

Na solução proposta, a procura do cliente 3 terá de ser assegurada por vários veículos. À semelhança do ocorrido na Instância 1 e devido à proximidade existente entre a procura dos clientes e a capacidade dos veículos, o aumento das janelas temporais não é o suficiente para haver uma redução da distância total percorrida ou do custo total otimizado. Desta forma os valores correspondentes aos resultados das rotas são de 585 quilómetros e de 40,95 €, respetivamente. De notar que, apesar de não haver alteração destes valores, as trajetórias realizadas pelos veículos foram-se alterando ao longo dos testes para diferentes janelas temporais.

5.2.4 Instância 4 – Alta Capacidade e Baixa Procura

Após concluído o estudo do problema com uma frota com capacidade de 11 toneladas, foi realizada uma análise ao problema com a utilização de uma frota com capacidade de 24 toneladas, para perceber o impacto do aumento da mesma.

Na instância presente, foi tida em consideração uma baixa procura por parte dos clientes. A mesma já foi utilizada nas Instâncias 1 e 2, tendo por base a Tabela 2.

Começaram-se por explorar os custos associados a uma distribuição com janelas de tempo de 30 minutos, tal como nos exemplos anteriores. A partir da Tabela 16 podem ser conferidas as rotas realizadas pelos veículos.

Tabela 16 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 30 minutos (Alta Capacidade e Baixa Procura)

Veículo 1	1	6	5	1	-	-
Veículo 2	-	-	-	-	-	-
Veículo 3	1	3	10	7	11	1
Veículo 4	-	-	-	-	-	-
Veículo 5	1	2	4	9	8	1
Veículo 6	-	-	-	-	-	-
Veículo 7	-	-	-	-	-	-

Ao comparar as rotas obtidas às da Tabela 9, é possível perceber que são feitas as mesmas trajetórias, havendo somente troca de veículos. Isto deve-se ao facto de, apesar de haver uma maior capacidade, as janelas de tempo não permitem que haja uma melhor solução que a obtida anteriormente. Desta forma a distância total associada a este teste tem um valor de 405 quilómetros e um custo de 28,35 €.

A janela de tempo de cada cliente foi, então, aumentada para 90 minutos, obtendo-se as rotas apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 90 minutos (Alta Capacidade e Baixa Procura)

Veículo 1	1	6	7	11	1	-
Veículo 2	-	-	-	-	-	-
Veículo 3	-	-	-	-	-	-
Veículo 4	-	-	-	-	-	-
Veículo 5	1	2	4	9	8	1
Veículo 6	1	3	10	5	1	-
Veículo 7	-	-	-	-	-	-

Tal como se verificou com as janelas temporais de 30 minutos, os trajetos realizados pelos veículos foram iguais aos obtidos na Tabela 10, havendo alteração de veículos. Desta forma, a distância e o custo totais assumiram os valores de 402,5 quilómetros e 28,18 €.

De seguida foram estudadas as janelas temporais de 180 minutos. Os resultados obtidos encontram-se presentes na Tabela 18.

Tabela 18 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 180 minutos (Alta Capacidade e Baixa Procura)

Veículo 1	1	4	2	10	3	9	8	1
Veículo 2	-	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 3	1	5	6	7	11	1	-	-
Veículo 4	-	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 5	-	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 6	-	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 7	-	-	-	-	-	-	-	-

Através da análise da solução encontrada, verifica-se que houve a diminuição da quantidade de veículos utilizados. Com a mesma, houve uma consecutiva diminuição da distância total percorrida, de 376,25 quilómetros e um custo total de 26,34 €. Denota-se uma melhora considerável da solução anteriormente encontrada.

Optou-se por continuar a aumentar as janelas temporais, passando as mesmas para 240 minutos. Este aumento traduziu-se na obtenção das rotas presentes na Tabela 19.

Tabela 19 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 240 minutos (Alta Capacidade e Baixa Procura)

Veículo 1	-	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 2	-	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 3	1	4	2	7	11	9	8	1
Veículo 4	-	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 5	1	6	5	10	3	1	-	-
Veículo 6	-	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 7	-	-	-	-	-	-	-	-

Apesar da quantidade de veículos se manter a mesma quando em comparação a janelas de tempo de 180 minutos, sucedeu-se uma alteração nas rotas dos veículos, resultando numa diminuição para os 337,5 quilómetros de distância total e uma diminuição no custo total para 23,63 €.

Finalmente foram consideradas janelas temporais de 480 minutos, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 480 minutos (Alta Capacidade e Baixa Procura)

Veículo 1	1	5	4	2	10	3	8	9	11	7	6	1
Veículo 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Devido a uma grande extensão da janela temporal, congregada com uma grande capacidade dos veículos de distribuição, verifica-se que a mesma pode ser realizada por um único veículo, fazendo com que haja uma conseguinte diminuição na distância total e no custo total. Os valores destes parâmetros foram 315 quilómetros e 22,05 €, obtendo-se assim a solução mais baixa até ao momento.

5.2.5 Instância 5 – Alta Capacidade e Procura Média

Na instância presente, a capacidade dos veículos continua a ser de 24 toneladas, tal como a anteriormente apresentada. No entanto há um aumento da procura, sendo que os clientes assumem uma procura igual à presente na Tabela 14, anteriormente mostrada.

De forma idêntica aos testes realizados nas instâncias anteriores, as janelas de tempo utilizadas são apresentadas nas Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7.

Inicialmente foram utilizadas as janelas de 30 minutos, resultando nas rotas presentes na **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

Veículo 1					
Veículo 2	1	2	9	8	1
Veículo 3	1	3	10	1	
Veículo 4	1	4	5	1	
Veículo 5					
Veículo 6	1	6	7	11	1
Veículo 7					

Através das mesmas foram obtidos uma distância total de 448,75 quilómetros e um custo total de 31,41 €, com a utilização de quatro dos sete veículos disponíveis.

Ao aumentar as janelas temporais para 90 minutos ocorreram alterações nas trajetórias dos variados veículos (Tabela 21), o que desencadeou uma descida tanto ao nível da

distância total como ao nível do custo total, passando os mesmos a assumir valores de 437,5 quilómetros e 30,63 €, respetivamente.

Tabela 21 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 90 minutos (Alta Capacidade e Procura Média)

Veículo 1	-	-	-	-	-
Veículo 2	1	2	9	8	1
Veículo 3	1	3	10	1	-
Veículo 4	1	4	5	1	-
Veículo 5	-	-	-	-	-
Veículo 6	1	6	7	11	1
Veículo 7	-	-	-	-	-

Seguidamente, as janelas de tempo foram aumentadas para 180 minutos, tal como ocorrera nas variadas instâncias anteriormente analisadas. As trajetórias obtidas para este caso foram as apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 180 minutos (Alta Capacidade e Procura Média)

Veículo 1	1	5	1	-	-
Veículo 2	1	3	10	6	1
Veículo 3	1	2	7	11	1
Veículo 4	-	-	-	-	-
Veículo 5	-	-	-	-	-
Veículo 6	1	4	9	8	1
Veículo 7	-	-	-	-	-

Ainda que a quantidade de veículos utilizados se mantenha, com a alteração das rotas anteriores, ocorre uma alteração no que toca à distância total, passando a mesma a tomar um valor de 416,25€, bem como no custo total, assumindo um valor de 29,14€.

Posteriormente, as janelas de tempo foram aumentadas para 240 minutos. A Tabela 23, apresentada de seguida, apresenta as novas rotas de cada veículo.

Tabela 23 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 240 minutos (Alta Capacidade e Procura Média)

Veículo 1	-	-	-	-	-	-
Veículo 2	1	6	10	5	1	-
Veículo 3	1	3	11	9	8	1
Veículo 4	-	-	-	-	-	-
Veículo 5	1	4	2	7	1	-
Veículo 6	-	-	-	-	-	-
Veículo 7	-	-	-	-	-	-

Tal modificação levou, tanto a uma alteração do número de veículos utilizados na distribuição, como a uma nova diminuição da distância e do custo totais, para valores iguais a 397,5 quilómetros e 27,83 €, respetivamente.

Finalmente foram consideradas janelas temporais com um intervalo de 480 minutos. Apesar da quantidade de veículos utilizados ter continuado a mesma, a trajetória tomada pelos mesmos foi alterada, fazendo com que houvesse uma nova alteração nos valores da distância total e do custo total. As rotas realizadas apresentam-se na Tabela 24.

Tabela 24 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 480 minutos (Alta Capacidade e Procura Média)

Veículo 1	1	4	5	1	-	-	-
Veículo 2	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 3	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 4	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 5	-	-	-	-	-	-	-
Veículo 6	1	3	10	2	7	6	1
Veículo 7	1	7	11	9	8	1	-

A distância total passou a assumir um valor de 390 quilómetros e o custo total otimizado um valor de 27,3 €.

5.2.6 Instância 6 – Alta Capacidade e Alta Procura

Por último foram consideradas tanto uma alta capacidade por parte dos veículos, isto é, de 24 toneladas, como uma alta procura por parte dos clientes, com valores a variar entre as 10 toneladas e as 24 toneladas. De modo a haver uma melhor perceção por parte do leitor, as procuras de cada cliente encontram-se presentes na Tabela 25.

Tabela 25 - Alta Procura dos Clientes

	Clientes									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Procura dos Clientes	12	14	20	18	11	16	10	21	17	15

Foram, inicialmente, estudadas as janelas de tempo de 30 minutos. As mesmas levaram a uma solução ótima que apresentava as rotas presentes na Tabela 26, para cada um dos veículos.

Tabela 26 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 30 minutos (Alta Capacidade e Alta Procura)

Veículo 1	1	2	7	11	1
Veículo 2	1	4	1	-	-
Veículo 3	1	2	10	1	-
Veículo 4	1	3	8	1	-
Veículo 5	1	5	1	-	-
Veículo 6	1	6	7	1	-
Veículo 7	1	9	1	-	-

Devido à possível proximidade entre os valores das procuras e o valor da capacidade dos veículos, foram necessários todos os veículos para a realização da distribuição. Os clientes 2 e 7, como se pode verificar através da análise dos resultados da Tabela 26, foram visitados por mais do que um veículo, de modo a satisfazer, por completo, a procura.

Na situação apresentada, e a ter como termo de comparação aos aumentos posteriores das janelas, a distância ótima obtida foi de 662,5 quilómetros, associada a um custo total de 46,38 €.

Para as seguintes janelas temporais, isto é, janelas de 90, 180 e 240 minutos, os resultados obtidos foram idênticos, sendo que só houve trocas ao nível dos veículos que ficaram responsáveis pela distribuição. Os dados correspondentes às trajetórias assumidas por cada um dos veículos, encontra-se presente na Tabela 27.

Tabela 27 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 90 minutos (Alta Capacidade e Alta Procura)

Veículo 1	1	6	7	11	1
Veículo 2	1	9	1	-	-
Veículo 3	1	4	1	-	-
Veículo 4	1	5	1	-	-
Veículo 5	1	2	7	1	-
Veículo 6	1	3	8	1	-
Veículo 7	1	6	10	1	-

A procura dos clientes 6 e 7, são satisfeitas por diferentes veículos. Para as três janelas distintas foram obtidos uma distância total de 650 quilómetros e um custo total de 45,50 €.

Finalmente foram realizados os testes para um valor de janela temporal igual a 480 minutos, o que resultou numa pequena descida da distância total percorrida para 642,5 quilómetros e numa descida do custo total para 44,98 €. Estas alterações deveram-se a alterações realizadas nas rotas dos veículos, as quais são apresentadas na Tabela 28. De

mencionar que as procures dos clientes 3, 6 e 7 foram completadas por diferentes veículos, levando cada um deles uma fração da procura total de cada cliente.

Tabela 28 - Trajeto dos Veículos para janelas temporais de 480 minutos (Alta Capacidade e Alta Procura)

Veículo 1	1	3	10	6	1
Veículo 2	1	11	7	1	-
Veículo 3	1	5	1	-	-
Veículo 4	1	4	1	-	-
Veículo 5	1	9	1	-	-
Veículo 6	1	3	8	1	-
Veículo 7	1	2	7	6	1

5.3 Resumo e Comparação dos Resultados das Instâncias

Primeiramente, ao analisar os resultados obtidos ao longo de cada instância de forma individual, pode-se perceber que, quanto maior a janela temporal utilizada, menor é a distância total percorrida e menos é o custo total. Nas instâncias 1 e 3, tanto a distância como os custos totais mantêm-se iguais à medida que as janelas de tempo são aumentadas, uma vez que, tal como mencionado anteriormente, a capacidade dos veículos utilizados é relativamente próxima à procura dos clientes. Para ocorrer essa diminuição, as procuras dos clientes teriam de ser inferiores, a capacidade dos veículos utilizados teria de ser superior ou a frota de veículos deveria ser maior.

Analisar-se agora os resultados obtidos entre diferentes instâncias. Ao haver uma baixa procura, pode-se verificar que a distância total percorrida e o custo total são inferiores para uma capacidade superior. Apesar de, inicialmente, para janelas temporais de 30 e 90 minutos, os parâmetros analisados serem iguais, no caso de uma capacidade alta ou média, à medida que as janelas de tempo aumentam, os valores vão-se distanciando, havendo assim uma melhor otimização para uma frota com capacidade de 24 toneladas. Analisando a influência das diferentes capacidades para uma procura média, é possível denotar que a distância e o custo são inferiores para uma frota de veículos com uma capacidade superior (24 toneladas), semelhante ao que se verificou para uma baixa procura.

Assim conclui-se que com o aumento da capacidade, de forma geral, e se a quantidade de produtos a transportar assim o justificar, a distância total e o custo total diminuem.

De seguida, na Tabela 29, é apresentado o resumo dos resultados obtidos, de forma a haver uma melhor compreensão dos resultados.

Tabela 29 - Resumo dos Resultados Obtidos para um número de clientes fixo

Instância				Solução		
#	Capacidade (toneladas)	Procura	ΔTW	Número de Veículos utilizados	Distância (quilómetros)	Custo (€)
1	3	Baixa	30	7 de 7	672,5	47,08
	3	Baixa	90	7 de 7	672,5	47,08
	3	Baixa	180	7 de 7	672,5	47,08
	3	Baixa	240	7 de 7	672,5	47,08
	3	Baixa	480	7 de 7	672,5	47,08
2	11	Baixa	30	3 de 7	405	28,35
	11	Baixa	90	3 de 7	402,5	28,18
	11	Baixa	180	3 de 7	391,25	27,39
	11	Baixa	240	2 de 7	355	24,85
	11	Baixa	480	2 de 7	340	23,8
3	11	Média	30	7 de 7	585	40,95
	11	Média	90	7 de 7	585	40,95
	11	Média	180	7 de 7	585	40,95
	11	Média	240	7 de 7	585	40,95
	11	Média	480	7 de 7	585	40,95
4	24	Baixa	30	3 de 7	405	28,35
	24	Baixa	90	3 de 7	402,5	28,18
	24	Baixa	180	2 de 7	376,25	26,34
	24	Baixa	240	2 de 7	337,5	23,63
	24	Baixa	480	1 de 7	315	22,05
5	24	Média	30	4 de 7	448,75	31,41
	24	Média	90	4 de 7	437,5	30,63
	24	Média	180	4 de 7	416,25	29,14
	24	Média	240	3 de 7	397,5	27,83
	24	Média	480	3 de 7	390	27,3
6	24	Alta	30	7 de 7	662,5	46,38
	24	Alta	90	7 de 7	650	45,5
	24	Alta	180	7 de 7	650	45,5
	24	Alta	240	7 de 7	650	45,5
	24	Alta	480	7 de 7	642,5	44,98

6 Conclusão

O objetivo proposto para esta dissertação foi cumprido. Foi feita uma revisão de literatura para perceber e enquadrar a problemática. Considerando os documentos analisados para a execução do presente trabalho, é possível perceber que as soluções desenvolvidas para o VRP e suas variantes, são cada vez mais importantes e cada vez mais urgentes, uma vez que as empresas necessitam das mesmas para o seu melhor funcionamento. A transformação digital e o acesso a tecnologia permitem a utilização de modelos para suportar a tomada de decisão e operações. O desenvolvimento e evolução destes é essencial tanto para o fornecedor como para o cliente, uma vez que ambos beneficiam com a obtenção de uma melhor solução.

Por um lado, o fornecedor conseguirá, a partir de melhores soluções para os seus problemas de roteamento, aumentar a sua eficiência e diminuir os custos que a empresa terá associados à entrega de encomendas. Por outro lado, o cliente, terá maior nível de serviço, aumentando assim o seu grau de satisfação e, conseqüente, a sua retenção na empresa que o serviu.

No caso de estudo considerado, conclui-se que, com o aumento das janelas de tempo há uma diminuição do tempo global da viagem e da satisfação do cliente, reduzindo o tempo para a obtenção da solução. Estas variações levam, conseqüentemente, a uma redução do custo de entrega para o fornecedor. Contrariamente, com a diminuição das janelas de tempo, todos os fatores mencionados anteriormente são influenciados de forma oposta.

Finalmente, e passando para a análise dos resultados obtidos a partir da solução desenvolvida, é possível verificar qual é o comportamento do custo das entregas para o fornecedor com o aumento e com a diminuição das janelas de tempo. Para uma melhor análise não são alterados os dados respetivos aos veículos de entrega (isto é, é a mesma quantidade de veículos e possuem exatamente a mesma capacidade) e os dados dos clientes (isto é, mantem-se o número de clientes e também a sua procura).

Através dos resultados obtidos, conclui-se que, por um lado, as janelas de tempo não devem ser demasiado pequenas, caso contrário, o custo ótimo pode ser demasiado elevado ou a solução pode ser mesmo impossível, apesar do último caso não ter sido verificado nos testes apresentados. Por outro lado, as mesmas também não devem ser demasiado grandes, uma vez que, apesar de não considerado no problema, a satisfação dos clientes diminui ao longo do tempo e o tempo de processamento aumenta. Desta forma, deve ser encontrado um equilíbrio entre os interesses da empresa e o interesse dos clientes. Uma

solução que resolve, em parte, este problema, é a colocação, por parte da empresa, de horários de entrega predefinidos, dos quais os clientes podem escolher, havendo assim benefícios para ambas as partes. Conforme as necessidades das empresas, devem ser consideradas capacidades capazes de satisfazer o maior número de clientes possível, de modo a diminuir a distância percorrida e o custo total. No caso das capacidades dos veículos serem relativamente próximas às procuras dos clientes, a otimização do problema é mais difícil ou até mesmo impossível, por maiores que as janelas de tempo sejam.

7 Trabalho Futuro

Já de olhos colocados no futuro, pretende-se melhorar o modelo desenvolvido, de modo a ter em consideração o nível de satisfação dos clientes, procurando conjugar a minimização do custo dos encargos com a maximização da qualidade do serviço.

Uma melhoria a realizar no modelo desenvolvido seria a adição da possibilidade de ter clientes dinâmicos, bem como a alteração de horários previamente definidos, conjugando assim as duas vertentes de *VRP* faladas ao longo deste documento e desenvolvendo uma solução para um *DVRPTW*. O mencionado resultaria na alteração de rotas ótimas, mas representaria, para a empresa, a possibilidade de responder a uma maior quantidade de clientes e de forma rápida.

Uma outra possibilidade a ser estudada e desenvolvida seria o facto dos veículos que, muitas vezes concluem a trajetória primeiramente designada na parte da manhã, poderem realizar uma outra trajetória da parte da tarde, havendo assim a necessidade de utilização de menos um dos veículos.

Referências

- [1] B. H. Ojeda Rios, E. C. Xavier, F. K. Miyazawa, P. Amorim, E. Curcio, and M. J. Santos, “Recent dynamic vehicle routing problems: A survey,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 160, p. 107604, Oct. 2021.
- [2] S. N. Kumar and R. Panneerselvam, “A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants,” *Intell. Inf. Manag.*, vol. 04, no. 03, pp. 66–74, 2012.
- [3] R. Ramachandran Pillai and M. Arock, “Spiking neural firefly optimization scheme for the capacitated dynamic vehicle routing problem with time windows,” *Neural Comput. Appl.*, vol. 33, no. 1, pp. 409–432, 2021.
- [4] M. Okulewicz and J. Mańdziuk, “A metaheuristic approach to solve Dynamic Vehicle Routing Problem in continuous search space,” *Swarm Evol. Comput.*, vol. 48, pp. 44–61, Aug. 2019.
- [5] H. Zhang, H. Ge, J. Yang, and Y. Tong, “Review of Vehicle Routing Problems: Models, Classification and Solving Algorithms,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 29, no. 1, pp. 195–221, 2022.
- [6] H. Zhang, H. Ge, J. Yang, and Y. Tong, “Review of Vehicle Routing Problems: Models, Classification and Solving Algorithms,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 29, no. 1, pp. 195–221, 2022.
- [7] E. Kucharska, “Dynamic Vehicle Routing Problem—Predictive and Unexpected Customer Availability,” *Symmetry 2019, Vol. 11, Page 546*, vol. 11, no. 4, p. 546, Apr. 2019.
- [8] V. Pillac, M. Gendreau, C. Guéret, and A. L. Medaglia, “A review of dynamic vehicle routing problems,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 225, no. 1, pp. 1–11, Feb. 2013.
- [9] H. N. Psaraftis, M. Wen, and C. A. Kontovas, “Dynamic Vehicle Routing Problems: Three Decades and Counting,” vol. 67, no. 1, pp. 3–31, 2016.
- [10] G. Clarke and J. W. Wright, “Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points,” <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>, vol. 12, no. 4, pp. 568–581, Aug. 1964.
- [11] B. E. Gillett and L. R. Miller, “A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch

- Problem,” <https://doi.org/10.1287/opre.22.2.340>, vol. 22, no. 2, pp. 340–349, Apr. 1974.
- [12] M. L. Fisher and R. Jaikumar, “A generalized assignment heuristic for vehicle routing,” *Networks*, vol. 11, no. 2, pp. 109–124, Jun. 1981.
- [13] J. Beasley, “Route first—Cluster second methods for vehicle routing,” *Omega*, vol. 11, no. 4, pp. 403–408, Jan. 1983.
- [14] J. F. Cordeau, M. Gendreau, A. Hertz, G. Laporte, and J. S. Sormany, “New heuristics for the vehicle routing problem,” in *Logistics Systems: Design and Optimization*, 2005, pp. 279–297.
- [15] M. Gendreau, G. Laporte, and J.-Y. Potvin, “6. Metaheuristics for the Capacitated VRP,” in *The Vehicle Routing Problem*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002, pp. 129–154.
- [16] H. N. Psaraftis, “DYNAMIC PROGRAMMING SOLUTION TO THE SINGLE VEHICLE MANY-TO-MANY IMMEDIATE REQUEST DIAL-A-RIDE PROBLEM,” *Transp. Sci.*, vol. 14, no. 2, pp. 130–154, May 1980.
- [17] R. Montemanni, L. M. Gambardella, A. E. Rizzoli, and A. V Donati, “Ant Colony System for a Dynamic Vehicle Routing Problem,” 2005.
- [18] N. Azi, M. Gendreau, and J. Y. Potvin, “A dynamic vehicle routing problem with multiple delivery routes,” *Ann. Oper. Res.*, vol. 199, no. 1, pp. 103–112, 2012.
- [19] P. Chen, B. Golden, X. Wang, and E. Wasil, “INTERNATIONAL TRANSACTIONS IN OPERATIONAL RESEARCH A novel approach to solve the split delivery vehicle routing problem,” *Intl. Trans. Op. Res*, vol. 24, pp. 27–41, 2017.
- [20] S. Chen, R. Chen, G. G. Wang, J. Gao, and A. K. Sangaiah, “An adaptive large neighborhood search heuristic for dynamic vehicle routing problems,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 67, pp. 596–607, Apr. 2018.
- [21] E. Angelelli, N. Bianchessi, R. Mansini, and M. G. Speranza, “Short Term Strategies for a Dynamic Multi-Period Routing Problem,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 106–119, Apr. 2009.

- [22] M. Albareda-Sambola, E. Fernández, and G. Laporte, “The dynamic multiperiod vehicle routing problem with probabilistic information,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 48, pp. 31–39, Aug. 2014.
- [23] D. Feillet, P. Dejax, and M. Gendreau, “An Exact Algorithm for the Elementary Shortest Path Problem with Resource Constraints: Application to Some Vehicle Routing Problems,” vol. 44, no. 3, pp. 216–229, 2004.
- [24] Z. Qing, Q. Limin, L. Yingchun, and Z. Shanjun, “An improved particle swarm optimization algorithm for vehicle routing problem with time windows,” in *2006 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2006*, 2006, pp. 1386–1390.
- [25] D. M. Miranda and S. V. Conceição, “The vehicle routing problem with hard time windows and stochastic travel and service time,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 64, pp. 104–116, Dec. 2016.
- [26] G. Desaulniers, O. B. G. Madsen, and S. Ropke, “Chapter 5: The Vehicle Routing Problem with Time Windows,” in *Vehicle Routing*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2014, pp. 119–159.
- [27] D. Taş, O. Jabali, and T. Van Woensel, “A vehicle routing problem with flexible time windows,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 52, no. PART A, pp. 39–54, 2014.
- [28] R. Baldacci, A. Mingozzi, and R. Roberti, “Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 218, no. 1, pp. 1–6, Apr. 2012.
- [29] R. A. Russell and T. L. Urban, “Vehicle routing with soft time windows and Erlang travel times,” *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 59, no. 9, pp. 1220–1228, 2008.
- [30] D. Taş, N. Dellaert, T. van Woensel, and T. de Kok, “The time-dependent vehicle routing problem with soft time windows and stochastic travel times,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 48, pp. 66–83, Nov. 2014.
- [31] F. Errico, G. Desaulniers, M. Gendreau, W. Rei, and L. M. Rousseau, “A priori optimization with recourse for the vehicle routing problem with hard time windows and stochastic service times,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 249, no. 1, pp. 55–66, Feb. 2016.
- [32] F. Errico, G. Desaulniers, M. Gendreau, W. Rei, and L. M. Rousseau, “The vehicle

- routing problem with hard time windows and stochastic service times,” *EURO J. Transp. Logist.*, vol. 7, no. 3, pp. 223–251, Sep. 2018.
- [33] E. Miller-Hooks and H. S. Mahmassani, “Optimal Routing of Hazardous Materials in Stochastic, Time-Varying Transportation Networks,” <https://doi.org/10.3141/1645-18>, no. 1645, pp. 143–151, Jan. 1998.
- [34] G. Righini and M. Salani, “Symmetry helps: Bounded bi-directional dynamic programming for the elementary shortest path problem with resource constraints,” *Discret. Optim.*, vol. 3, no. 3, pp. 255–273, Sep. 2006.
- [35] M. Jepsen, B. Petersen, S. Spoorendonk, and D. Pisinger, “Subset-Row Inequalities Applied to the Vehicle-Routing Problem with Time Windows,” <https://doi.org/10.1287/opre.1070.0449>, vol. 56, no. 2, pp. 497–511, Dec. 2007.
- [36] G. Budak and · Xin Chen, “Evaluation of the size of time windows for the travelling salesman problem in delivery operations,” *Complex Intell. Syst.*, vol. 6, pp. 681–695, 2020.