



SIMULATED ANNEALING APLICADO A UM PROBLEMA DE ROTEAMENTO REAL DO TIPO VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME WINDOWS

ANTÓNIO GONÇALO DELINDRO FERREIRA DA CUNHA

novembro de 2021

OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE DISTRIBUIÇÃO COM JANELAS TEMPORAIS

António Gonçalo Delindro Ferreira da Cunha

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE DISTRIBUIÇÃO COM JANELAS TEMPORAIS

António Gonçalo Delindro Ferreira da Cunha

Estudante n.º 1161452

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação da Professora Doutora Maria Teresa Ribeiro Pereira e da Professora Doutora Marisa João Guerra Pereira de Oliveira.

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial à minha família, mãe, pai, irmã por toda a força e apoio que prestaram durante este último ano atípico.

Às professoras, Maria Teresa Ribeiro e Marisa Oliveira, que me orientaram na realização da dissertação agradecendo por toda a sua disponibilidade, interesse e apoio prestado.

Por fim, quero agradecer aos meus amigos mais próximos por me terem dado sempre o melhor incentivo para terminar este percurso da minha vida.

A todos eles um muito obrigado!

página propositadamente em branco

RESUMO

O tema desta dissertação consiste em desenvolver um modelo matemático de otimização e analisar o seu impacto num problema real aplicado a rotas de camiões.

Quanto à metodologia adotada, recolheu-se os dados disponibilizados pela empresa Metalgalva no sentido de apurar da maneira mais eficaz os valores reais para conseguir obter resultados expressivos. Após levantamento dos dados é necessário incorporar as diversas variáveis que compõem o problema real em análise. Isto é, o número de clientes, sua localização, custo de transporte e as janelas temporais afetas aos clientes.

De modo a proceder a este estudo, foi adotada uma formulação matemática onde foram definidos todos os parâmetros que englobam um VRPTW (*Vehicle Routing Problem with Time Windows*).

O problema foi formulado para ser usado como um programa MIP (*Mixed integer programming*).

Foi concluído que a utilização de este modelo traz grandes vantagens à empresa, diminuindo o custo de transporte em 35% tendo em conta a média atual da empresa caso de estudo. Ainda, pode ajudar a empresa a tomar uma decisão no futuro para a implementação de um *software* para gestão e otimização de rotas.

PALAVRAS-CHAVE

Otimização, *VRP*, janelas temporais, roteamento de veículos, métodos exatos

página propositadamente em branco

ABSTRACT

The subject of this dissertation consists in developing a mathematical optimisation model and analysing its impact on a real problem applied to truck routing.

For the methodology adopted, it was retrieved the data put available by the company Metalogalva so that the data correspond to the reality and so that the result shave the best reliability . In order to carry out this study and after surveying the problem it is necessary to incorporate the various variables that make up the real problem under analysis. That is, the number of customers, their location, transport costs and the time windows allocated to customers.

In order to proceed with this study, a mathematical formulation was adopted in which all the parameters that comprise a VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows) were defined.

The problem was formulated to be used as a MIP (Mixed integer programming) program.

It was concluded that the use of this model brings great advantages to the company, decreasing the transport cost by 35% considering the current average of the case study company. Still, it can help the company to make a decision in the future to implement a software for route management and optimisation.

KEYWORDS

Otimisation, Vehicle Routing Problem, time windows, exact methods.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XIII
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Enquadramento e pertinência	15
1.2. Objetivos de investigação.....	16
1.3. Metodologia	16
1.4. Estrutura do trabalho	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. Logística, Distribuição e Transportes	19
2.1.1. Impacto económico	20
2.2. Problemas de roteamento de veículos	21
2.2.1. Travelling Salesman Problem	22
2.2.2. Vehicle Routing Problem.....	22
2.2.3. Capacitated Vehicle Routing Problem	23
2.2.4. VRP com janelas temporais.....	23
2.3. Métodos de resolução dos VRP.....	23
2.3.1. <i>Métodos Exatos</i>	24
2.3.2. <i>Métodos Heurísticos</i>	25
2.3.3. <i>Métodos Meta heurísticos</i>	25
3. Desenvolvimento	27
3.1. Descrição do Problema.....	27
3.2. Pressupostos de formulação	28
3.2.1. Pressupostos dos clientes	28
3.2.2. Pressupostos dos períodos de tempo.....	29
3.3. Formulação do problema	29
3.3.1. Variáveis de decisão.....	31
3.3.2. Função objetivo.....	31
3.4. Resultados	32
3.4.1. Análise dos Resultados.....	34
4. CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
Anexo A	45
Anexo B	47
Anexo C	48

Anexo D	49
Anexo E.....	51
Anexo F.....	52
Anexo G	53
Anexo H.....	54
Anexo I.....	55
Anexo J	56
Anexo K.....	58

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Distância percorrida (em quilómetros) percorrida ao longo dos anos por diferentes meios de transporte fonte (Chai et al., 2012)	21
Figura 2 - Conceito geral dos VRP fonte: (Autor)	22
Figura 3 - Métodos para Resolução dos VRP.....	24
Figura 4 - Coordenadas dos clientes	28
Figura 5 - Rota Otimizada.....	33

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Pressupostos dos períodos de tempo	29
Tabela 2 Pressupostos dos períodos de tempo de serviço	30
Tabela 3 Rota e tempo acumulado para o problema inicial	33
Tabela 4 - Custo da viagem entre o nó i e o nó j	45
Tabela 5 - Tempo de viagem entre o nó i e o nó j	47
Tabela 6 - Instância 1.....	48
Tabela 7 - Custo da distância entre o nó i e nó j para a segunda instância	49
Tabela 8 - Instância 2.....	51
Tabela 9 - Custo da distância entre o nó i e nó j para a terceira instância	52
Tabela 10 - Instância 3.....	53
Tabela 11 - Custo da distância entre o nó i e nó j para a quarta instância	54
Tabela 12 - Instância 4.....	55
Tabela 13 - Custo da distância entre o nó i e nó j para a quinta instância	56
Tabela 14 - Instância 5.....	58

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
VRP	Vehicle Routing Problem
CVRP	Capacitated Vehicle Routing Problem
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows
TSP	Travelling Salesman Problem
IMF	International Monetary Fund
SA	Simulated Annealing
TS	Tabu Search
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure

página propositadamente em branco

1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo é feita uma breve apresentação da organização onde decorreu o projeto, a contextualização do problema e objetivos, a metodologia utilizada para a sua concretização e, por fim, a estrutura desta dissertação.

1.1. Enquadramento e pertinência

A presente dissertação insere-se na unidade curricular “dissertação/estágio/projeto” do 2º ano do curso de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial do departamento de Engenharia Mecânica (DEM) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) do Politécnico do Porto.

O assunto desenvolvido nesta dissertação surgiu do trabalho desempenhado na empresa Metalgalva. A Metalgalva é um empresa do setor metalomecânico, produzindo estruturas metálicas de grandes dimensões estando presente nos mercados de iluminação pública, catenárias ou postes de alta tensão. Conta com mais de 650 colaboradores e atua em mais de 10 países diferentes. O objetivo é de otimizar as rotas realizadas para satisfazer os clientes do mercado francês. Este mercado tem de uma média de 15 descargas por camião em que cada cliente possui a sua janela temporal onde é possível realizar as entregas o que acrescenta uma complexidade adicional dado o elevado número de clientes diferentes bem como as diferentes condições entre eles.

A Logística é uma importante integrante das empresas onde, geralmente, é englobado todo o processo desde a compra da matéria-prima até ao transporte do produto final. Abrangida por fluxos internos e externos, a Logística tem um enorme impacto na componente operacional, tendo ainda a função adicional de criar os elos necessários entre os diversos setores dentro de uma determinada cadeia de abastecimento ou fluxo produtivo.

Os problemas de roteamento de veículos são dos problemas mais estudados dentro da área da Logística. Surgiram diversas ramificações destes problemas, sendo que a sua complexidade varia dentro das diferentes tipologias de problemas. No caso desta dissertação, o problema em estudo está enquadrado dentro dos problemas de roteamento de veículos com janelas temporais. Nestes casos, os veículos necessitam de entregar o produto ao cliente final numa determinada janela temporal.

1.2. Objetivos de investigação

A presente dissertação tem como objetivo desenhar uma solução para o problema de construção de rotas com um elevado número de clientes com janelas temporais diferentes entre si.

Pretende-se atingir o principal objetivo cumprindo os seguintes pontos:

- Definir indicadores mensuráveis de comparação entre o cenário atual e a solução proposta;
- Formular um modelo determinístico para o problema;
- Encontrar uma solução sem aumento custos adicionais;
- Calcular o impacto da solução definida.

1.3. Metodologia

A metodologia é o estudo de caso, com aplicação de modelo de otimização de roteamento com janelas temporais, VRPTW, utilizando a ferramenta da IBM CPLEX combinada com o Excel. Para testar o modelo foram realizadas 5 instâncias com dados reais da empresa.

1.4. Estrutura do trabalho

A presente dissertação será estruturada em 4 partes distintas.

Numa primeira parte é feita a introdução ao problema e a definição dos objetivos. Na segunda parte é apresentada toda a pesquisa bibliográfica que serviu de apoio à dissertação. Na terceira parte o autor apresentará a formulação do problema bem como os resultados e a sua análise.

Por fim, irá demonstra-se as conclusões retiradas de todo o trabalho realizado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo irá ser apresentada toda a informação que suporta o desenvolvimento apresentado no capítulo seguinte. As referências estão apresentadas no capítulo Referências Bibliográficas.

2.1. Logística, Distribuição e Transportes

A logística pode ser vista como a responsável pelo fornecimento de bens e serviços desde um ponto de fornecimento até um ou vários pontos de consumo (Tan et al., 2001). Normalmente, um sistema logístico abrange o transporte das matérias-primas, desde o seu fornecedor até à fábrica e/ou indústria que está encarregue de produzir o bem, a movimentação desse produto para o armazém e a futura distribuição para os clientes.

A tendência atual é o enorme desenvolvimento nas tecnologias de comunicação e informação. Um dos fenómenos atuais, também se prende no aumento da necessidade da flexibilidade para conseguir mover pessoas ou bens. A atratividade e sucesso de uma empresa não é só avaliada pelo seu preço e qualidade, mas também, pela sua flexibilidade e capacidade de reação aos requisitos do cliente com celeridade (Pečený et al., 2020).

A logística começou por ser um termo militar designando algumas atividades de planeamento de operações militares. Hoje em dia, o termo logística pode ser definido como o processo de planear, implementar e controlar, adequada e eficientemente, o fluxo e armazenamento de bens, serviços e informação relacionada do ponto de origem ao ponto de consumo e vice-versa, por forma a satisfazer os requerimentos dos clientes (Costa et al., 2010).

As atividades que compõe a logística podem ser incluídas em duas funções principais, o transporte físico e a gestão de materiais (Hesse & Rodrigue, 2004).

- Transporte físico - é o termo genérico para as atividades que envolvem a movimentação de bens de pontos de produção para pontos de venda e consumo. Tem de assegurar que os requisitos de mobilidade da cadeia de abastecimento são cumpridos. Este tipo de função compreende todas as funções de movimentação e manuseamento de bens, particularmente serviços de transporte, serviços de armazenagem e retalho. Convencionalmente assume-se que todas estas atividades derivem de necessidades provenientes da gestão de materiais;
 - Gestão de materiais - considera todas as atividades ao longo da cadeia de abastecimento relacionadas com o fabrico de comodidades em qualquer fase da produção. Inclui, atividades de produção e marketing tais como o planeamento de produção, previsões de procura, gestão de aprovisionamento e inventário. Deve assegurar que os requisitos da cadeia de abastecimento são cumpridos ao lidar com uma ampla variedade de partes para a assemblagem e matéria-prima, incluindo o embalamento e, finalmente, a reciclagem das comodidades rejeitadas. Assume-se que todas estas atividades produzem uma necessidade para o transporte físico.
-

A distribuição é, então, derivada da gestão de materiais (especialmente, os de produção) mas, é coordenado conforme as capacidades da distribuição. Produção, distribuição e consumo dificilmente são separados.

Comparado com o anterior e mais tradicional tipo de sistemas de transporte, a evolução da gestão da cadeia de abastecimento e o aparecimento da indústria da logística pode estar relacionada com:

- O transporte é visto (tradicionalmente) como uma ferramenta para lidar com espaços. A logística é crítica em termos de tempo. Isto foi alcançado através de evoluções no sentido de integrações verticais, nomeadamente subcontratação e *outsourcing*, incluindo a própria função de logística;
- De acordo com alterações estruturais macroeconómicas, as atividades do lado da procura estão a tornar-se predominantes. Apesar de a tradicional entrega ser gerida principalmente pelo fornecedor, as cadeias de abastecimento são cada vez mais geridas pela procura;
- Serviços logísticos que se estão a tornar complexos e sensíveis ao tempo obrigando muitas empresas a optar por subcontratar parte das suas cadeias de abastecimento. Os terceiros, para além de beneficiarem de economias de escala, têm como propósito a oferta de soluções integradas para a distribuição e transporte.

Uma boa gestão torna-se fundamental para que os procedimentos de abastecimento e distribuição se façam eficazmente economizando uma parte considerável do custo total da distribuição. Rotas otimizadas e distâncias mais curtas diminuem não só o custo de transporte das mercadorias, mas também a possibilidade de penalizações devido a entregas fora do prazo (Tan et al., 2001).

Entre os principais custos logísticos destacam-se os seguintes (Costa et al., 2010).

- Custo de transporte;
- Custos de manutenção e manipulação de existências;
- Custos fixos e variáveis de instalações;
- Custos administrativos de gestão e controlo.

2.1.1. Impacto económico

O Fundo Internacional Monetário (IMF) explica o conceito de globalização como “o crescimento da interdependência económica dos países durante o aumento da multiplicidade e volume das transações entre fronteiras de bens e serviços, *flows* de capital mais livres e uma difusão tecnológica mais rápida” (Kherbash & Liviu, 2015). Ou seja, à medida que o mundo e a economia aumentam de tal forma que deixam de serem autónomos, seja por um aumento exponencial das suas necessidades e procura, seja por um aumento exponencial a nível tecnológico, começa o processo de globalização. Assim, o transporte desempenha uma função chave na conexão das

importações e exportações entre mercados. Atendendo ao facto de que a economia global está a sofrer uma vasta mudança, a necessidade para uma nova dinâmica logística aumenta (Kherbash & Liviu, 2015).

Conceptualmente, uma rede de transportes é um número de nós e ligações interconectados entre si. Há ainda interações entre o transporte e a economia. O transporte é um bem intermediário para que as ligações entre a mão de obra e os mercados de bens e serviços sejam altamente relevantes na definição de preços e políticas de investimento (Laird et al., 2005).

O transporte rodoviário continua a ser o meio de transporte preferido das empresas. Dado a sua versatilidade, a sua rápida resposta e agilidade e o seu alto fator económico, facilmente se percebe o porquê de continuar a ser o meio de transporte favorito. Representa a maior parte do volume de tráfego terrestre e tem registado um crescimento contínuo que por sua vez acarreta consequências positivas tais como o aumento da empregabilidade e do crescimento do produto interno bruto (Comissão Europeia, 2014).

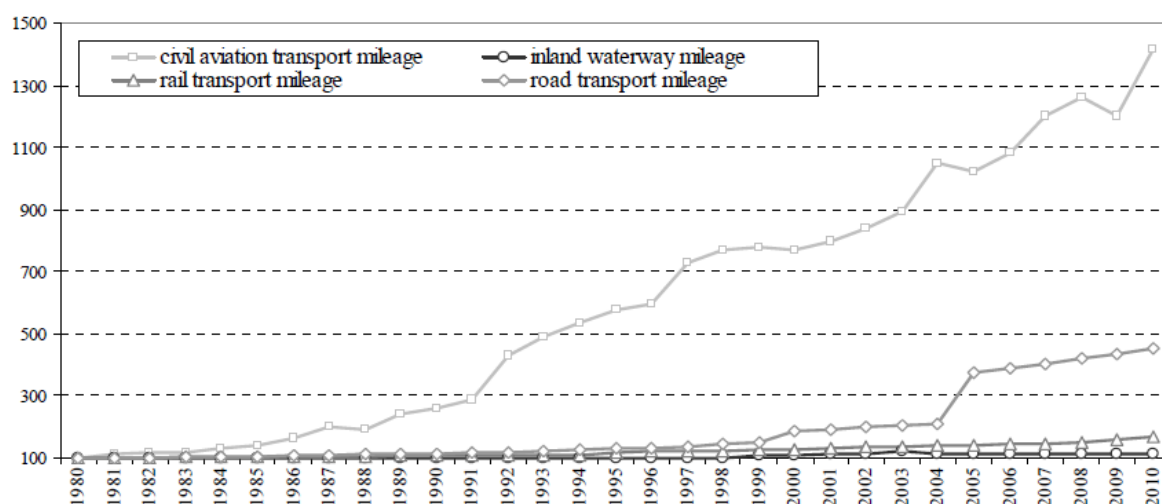


Figura 1 - Distância percorrida (em quilómetros) percorrida ao longo dos anos por diferentes meios de transporte fonte (Chai et al., 2012)

Conforme comprovado pela figura 1, o transporte rodoviário é o 2º maior em termos de distância percorrida sendo o 1º o transporte aéreo. Como seria expectável, o transporte aéreo será sempre o que maior distância percorre porque assim o é permitido. No entanto, percebe-se a enorme diferença entre o transporte rodoviário e o 3º transporte com a maior distância percorrida, cerca de 500 mil km para pouco mais de 100 mil km.

2.2. Problemas de roteamento de veículos

Ao longo dos anos, problemas de roteamento de veículos têm sido cada vez mais explorados e investigados. Surge uma necessidade crescente para as empresas tornarem os seus negócios rentáveis e lucrativos gerando um consequente investimento neste tipo de problemas.

2.2.1. Travelling Salesman Problem

Um dos problemas básicos da distribuição é o problema da distribuição circular. Este tipo de problema é conhecido pelo *travelling salesman problem* (TSP). O objetivo é servir localizações pré-definidas e após visitar todas as localizações voltar à sua posição inicial visitando uma única vez sem formar subrotas. O principal requisito deste problema é construir uma rota com a menor distância possível. Normalmente, neste tipo de problemas, não existe a necessidade de incluir a capacidade do veículo nos cálculos (Pečený et al., 2020).

2.2.2. Vehicle Routing Problem

Vehicle routing problem (VRP), é dos problemas mais estudados na área da Logística. Define-se para um conjunto de viaturas as suas repetitivas rotas de visita a locais definidos. Este tipo de problemas apresenta um grande número de variantes (Oliveira et al., 2014). Este processo é desenhado para determinar a melhor rota em termos de distância total, duração e custo (Ilhan, 2020).

Dada a sua vasta complexidade, tem-se vindo a desenvolver novos tipos de problemas para além da adição de modelos matemáticas ou algoritmos para auxiliar à resolução desses mesmos problemas.

O sucesso de um VRP deve ser atribuído à relação entre a teoria e a prática. Deve ser atribuído uma elevada importância à eficácia do modelo e da implementação. A chave do sucesso foca-se em aliar a capacidade dos algoritmos e a capacidade dos computadores (Marinakis & Migdalas, 2007).

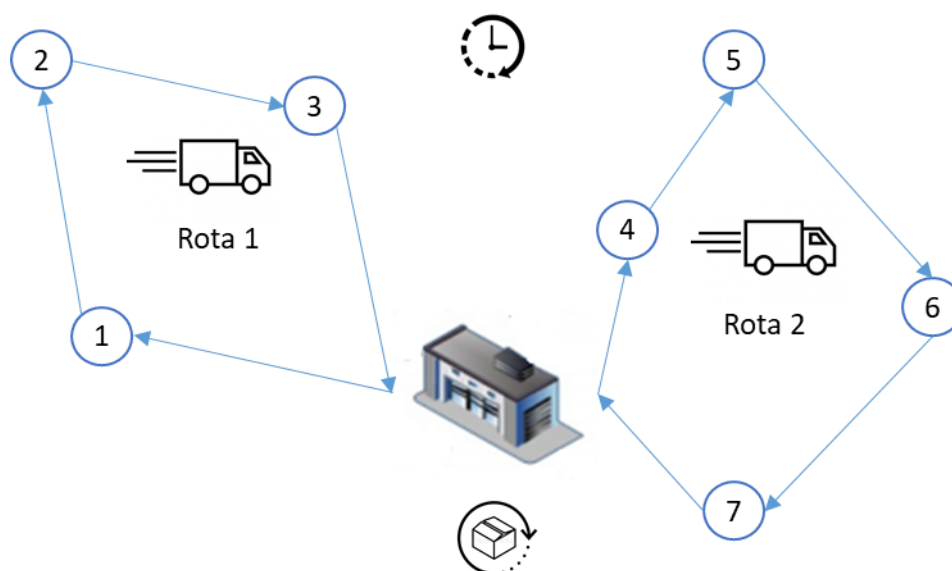


Figura 2 - Conceito geral dos VRP fonte: (Autor)

2.2.3. Capacitated Vehicle Routing Problem

Na prática, a formulação básica de um problema de VRP é aumentada por restrições como por exemplo a capacidade de um veículo revelando o Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) (Cari et al., 2008).

O CVRP é descrito frequentemente como o problema onde os veículos de um determinado centro de distribuição têm de efetuar várias entregas em clientes dispersos geograficamente para satisfazer as suas procuras. Este problema serve para contruir um conjunto de rotas de baixo custo e possíveis de realizar, para cada veículo. A rota é uma sequência de localizações que o veículo tem de visitar e o veículo deve iniciar e terminar no centro de distribuição (Marinakis & Migdalas, 2007). O TSP e o CVRP têm em comum a restrição principal da capacidade do veículo utilizado ser igual ou superior à procura total do veículo utilizado na rota a considerar. Ainda, como se trata de um VRP, existe ainda uma condição associada em que se tem disponível uma frota de veículos ao invés do TSP onde se está apenas a analisar um veículo apenas (Liu, 2009).

2.2.4. VRP com janelas temporais

O *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW) especifica que os clientes devem ser servidos dentro de um intervalo de tempo. Os veículos podem, também, ter uma janela de tempo específica onde podem operar (Marinakis & Migdalas, 2007).

O VRPTW é uma extensão do CVRP onde é acrescentada a restrição da existência de janelas temporais nos clientes e onde o veículo só poderá entregar dentro dessas mesmas janelas temporais.

Para este tipo de problema é preciso definir a janela temporal, o tempo de deslocação do depósito ao cliente, o tempo que o veículo permanece no cliente e o tempo de deslocação entre clientes (Liu, 2009).

A maior parte dos problemas reais envolvem restrições de capacidade e temporais (Cari et al., 2008).

2.3. Métodos de resolução dos VRP

Os modelos de decisão organizam informação proveniente de fontes primárias ou secundárias seguindo pressupostos e aplicando técnicas matemáticas e computacionais. Procuram representar a complexidade de um problema do mundo real de forma mais simplista, ao analisar problemas complexos sem os modificar em relação aos seus atributos mais importantes. Procura dividir o problema em partes menores sem perder a visão do todo. Fá-lo ao mapear os dados mais importantes, a relação entre eles e a relação com os “outputs” do modelo, e o impacto que estas partes podem ter na decisão final. Contudo, um modelo será sempre uma representação simplificada da realidade, não podendo o seu resultado ser reconhecido como a solução inquestionável porque foi produzido pelo método científico (de Soárez et al., 2014).

Assim, faz sentido a divisão em partes menores para que se torne possível a obtenção de uma solução plausível quando se está perante um problema real com uma elevada complexidade. Não é concebível aplicar um método exato para um problema com um número de variáveis grande porque não conseguiríamos obter um resultado aceitável em tempo útil, tal é o caso para problemas VRP reais.

Estes problemas podem ser classificados em três grupos quanto à origem e destino das mercadorias (Oliveira et al., 2014).

1. Composto pelos problemas “muitas (origens)-para-muitos (destinos)”. Qualquer vértice pode servir como uma fonte ou como um destino para qualquer mercadoria;
2. Composto pelos problemas “uma (origem)-para-muitos(destinos)-para um (destino) final”;
3. Composto pelos problemas “uma (origem)-para um (destino)”.

Estes problemas estão ainda associados a uma natureza estática ou. No caso estático, toda a informação é conhecida antecipadamente e não se altera durante a fase da construção e implementação da solução. No caso dinâmico, a informação disponível é atualizada (alterada) à medida que se constrói ou se implementa parte da solução, por força de novos pedidos dos utilizadores. Nestes problemas, a solução proposta será uma estratégia de solução que pode também ser alterada com o decorrer do tempo.

Existem vários métodos de resolução que podem ser categorizados da seguinte forma:

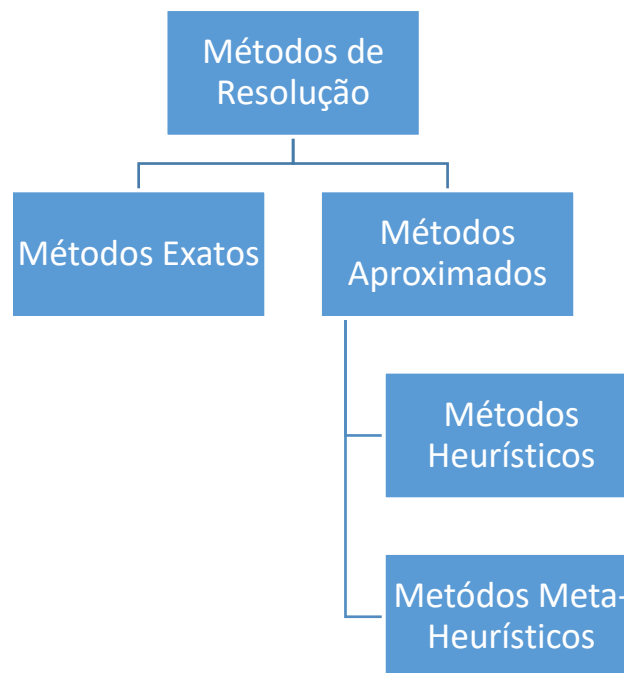


Figura 3 - Métodos para Resolução dos VRP

2.3.1. Métodos Exatos

Métodos exatos obtêm a solução ótima ao enumerar todas as soluções possíveis. Por isso, um VRP é um problema *NP-hard* em que não é expectável ou possível, desenvolver métodos exatos que consigam resolver um problema VRP em tempo útil. Isto deve-se em grande parte, à

complexidade associada a um problema VRP (Marinakis & Migdalas, 2007). Por exemplo, métodos como o algoritmo de *Cut & Branch*.

2.3.2. Métodos Heurísticos

Há três gerações de métodos heurísticos, categorizadas por Marshall Fisher, em 1995. Entre 1960 e 1970, desenvolveu-se a primeira geração - heurísticas simples - que basicamente se baseiam em *local search*. A segunda geração – heurísticas baseadas em programação matemática - eram algoritmos quase otimizados que eram diferentes das heurísticas normais. Isto inclui uma atribuição de problemas generalizados. Os resultados destes métodos são superiores em relação aos das heurísticas simples, algumas destas técnicas conseguem alcançar a solução ótima. A terceira geração, aquela que continua em estudo consiste em algoritmos de otimização exatos e métodos de inteligência artificial. Dentro desta geração, os algoritmos de maior sucesso são *K-Tree*, *Lagrangian Relaxation*, etc. enquanto os métodos representativos de AI para os VRPTW são: *Simulated Annealing* (SA), *Tabu Search* (TS) e algoritmos genéticos (Fisher, 1995).

A investigação atual foca-se em algoritmos de aproximação capazes de encontrar soluções de alta qualidade em tempos limitados, de forma a serem aplicáveis a problemas reais que são caracterizados por uma grande frota de veículos e que afetem significativamente estratégias de logística e distribuição.

Um método heurístico clássico tem a desvantagem de explorar apenas um subconjunto da totalidade de soluções possíveis. As evoluções de algoritmos modernos têm como objetivo colmatar essa falha e permitir a análise a soluções não ótimas (Kumar & Panneerselvam, 2012).

Os métodos heurísticos são muitas vezes utilizados na definição de rotas, pois permitem não só a construção de rotas, bem como analisar trocas entre as rotas, permitindo aos utilizadores responder às alterações de última hora (Moura, 2004).

2.3.3. Métodos Meta heurísticos

Um vasto número de algoritmos meta heurísticos foram propostos para a resolução de problemas do tipo VRPTW. Por exemplo:

- *Simulated Annealing* – desenvolvido a partir da lógica por detrás do processo de arrefecimento de metais. Este algoritmo compara a solução encontrada com a anterior sendo que existe uma probabilidade de aceitar uma solução não ótima;
- *Tabu Search* – o conceito genérico é de penalizar movimentos que levem a solução a espaços visitados previamente (também conhecidos como *tabus*). No entanto, pode aceitar soluções não ótimas de forma a não ficar "preso" em mínimos locais;
- GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) – consiste em criar uma solução inicial e depois efetuar um *local search* para uma solução com maior qualidade. A diferença prende-se na forma como cria a solução inicial. Isto tem a ver com as 3 iniciais G (*Greedy*, guloso), R (*Randomized*, aleatório) e A (*Adaptive*, adaptativo);

- Algoritmos genéticos - Inspirada pela teoria da seleção natural de Charles Darwin, estes algoritmos refletem o processo de seleção natural onde apenas os melhores indivíduos são selecionados para reproduzirem a próxima geração.

3. DESENVOLVIMENTO

No terceiro capítulo será apresentada a formulação do problema. Será resolvido recorrendo a uma base matemática, assumindo alguns pressupostos para uma melhor adequação face ao problema real. Por fim, apresentam-se os resultados que têm como objetivo minimizar o custo de transporte por tonelada transportada.

3.1. Descrição do Problema

Atualmente a o planeamento de rotas é feito por um gestor de produto afeto à gestão das encomendas do mercado francês. É dividido nas seguintes fases:

1. Verificação das encomendas possíveis de entregar;
2. Junção dos locais de entrega;
3. Otimização manual da rota do camião tendo em conta quilómetros percorridos e duração da viagem.

A presente dissertação foca-se, especialmente, na otimização do processo descrito na terceira fase.

Ao realizar uma otimização manual das rotas, especialmente quando existem diversos fatores que podem afetar as descargas, verifica-se que é um processo ineficiente e inadequado. Este tipo de planeamento traz diversas consequências negativas tais como, a incerteza do nível de eficiência da rota, a improdutividade associada a um processo manual e/ou o aumento de custos.

Para ajudar a colmatar e eliminar estes pontos negativos decidiu-se efetuar um estudo com o intuito de perceber qual o impacto de um planeamento mais cuidado e com auxílio de um *software* poderia trazer à empresa.

As rotas a serem otimizadas são caracterizadas, principalmente, pelo elevado número de descargas a efetuar. Isto significa que em média poderá realizar cerca de 20 descargas sendo que o tempo estimado desde que inicia a primeira descara até terminar são aproximadamente duas semanas. Adicionalmente, as descargas são referentes a clientes diferentes pelo que cada um tem a sua janela temporal na qual é possível efetuar uma entrega. Por isso, a formulação será a de um problema VRPTW sendo linear e que pode ser resolvida e encontrada uma solução ótima pela maioria dos MIP *solvers* para problemas de pequena dimensão. O *software* utilizado foi o IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio*.

3.2. Pressupostos de formulação

A formulação proposta utiliza a mesma base de funcionamento de um problema VRPTW. Um determinado conjunto de veículos (neste caso, apenas um veículo) será alocada conforme as necessidades sendo que o veículo terá de visitar os n clientes e satisfazer todas as suas necessidades dentro das janelas temporais pré-determinadas.

3.2.1. Pressupostos dos clientes

O conjunto de nós é definido como $N = \{0, 1, \dots, n\}$ em que n representa o número de clientes e o nó 0 representa o armazém. O conjunto de arcos que podem ser percorridos é representado por $A = \{(i, j): i \neq j, i, j \in N\}$ com uma determinada distância d_{ij} associada e com um tempo de percurso tp_{ij} que corresponde ao tempo que o veículo demora a deslocar-se entre os clientes e entre os clientes e o armazém. Cada cliente i , tem uma procura associada que requer um serviço de tempo s_i . De forma a simular um cenário real, serão atribuídas localizações aleatórias aos clientes. Devido a limitações de processamento de dados, a base de dados utilizada está limitada a quinze clientes.

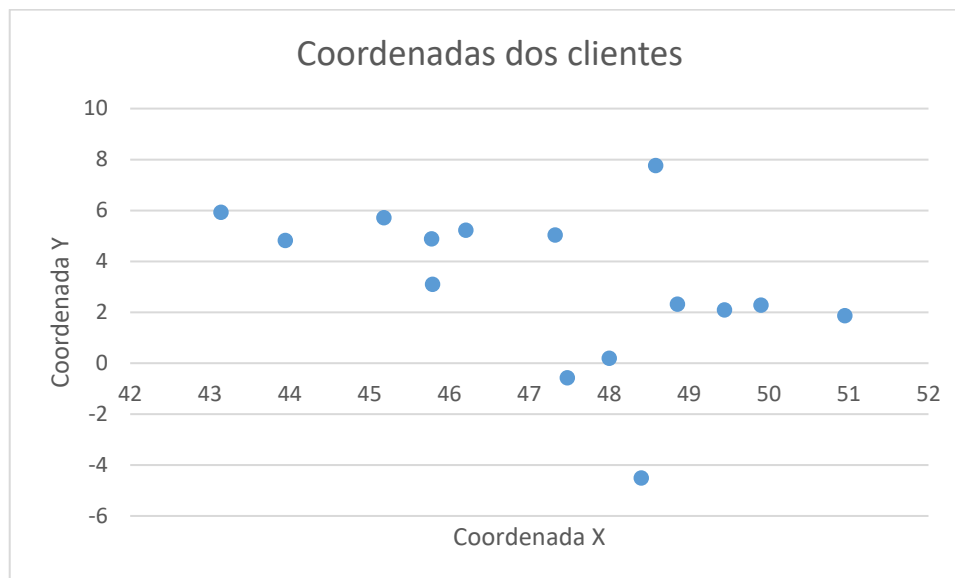


Figura 4 - Coordenadas dos clientes

Na figura 4 é apresentada a base de dados dos clientes utilizada para o processamento da formulação do problema atual. Esta base de dados foi construída aleatoriamente sendo os valores de x e y os valores referentes às coordenadas dos clientes.

3.2.2. Pressupostos dos períodos de tempo

O horizonte temporal é dividido arbitrariamente em m períodos de tempo, e cada período de tempo é definido pelo seu início a_i e fim b_i . Na tabela 1 são expostos os pressupostos assumidos no que diz respeito aos períodos de tempo.

Tabela 1 - Pressupostos dos períodos de tempo

	Período 1	Período 2
a_i	8h	14h
b_i	13h	17h

3.3. Formulação do problema

De forma a encontrar uma solução para o problema proposto, é necessário definir, a nível teórico, o problema em estudo. Assim, apresenta-se a seguir a formulação matemática que serve de base para o desenvolvimento da solução.

Definindo os parâmetros:

a_i Limite inferior da janela temporal do cliente i

b_i Limite superior da janela temporal do cliente i

d_{ij} Distância em quilómetros do cliente i ao cliente j

M Constante positiva de valor alto que garante a veracidade das restrições

tp_{ij} Tempo de percurso do cliente i ao cliente j , que corresponde ao tempo que o motorista leva a deslocar-se de um ponto ao outro

ts_i Tempo de serviço do cliente i , que corresponde ao tempo que o motorista despense na descarga dos volumes

Para descrever o problema em estudo na presente dissertação, assume-se $G = (V, A)$ como o sistema constituído pelo conjunto de nós $V = \{0, \dots, n + 1\}$ e pelo conjunto de arcos $A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$ que ligam os nós. O nó 0 corresponde à empresa Metalgalva e representa o ponto de partida e chegada para todas as rotas criadas.

A cada elemento A é atribuída uma distância d_{ij} , que corresponde à distância entre clientes e um tempo de percurso tp_{ij} , que corresponde ao tempo que o veículo leva a deslocar-se entre os clientes e entre os clientes e o armazém, que permitem calcular a distância total da rota e duração da mesma. De referir que foi assumido um VRPTW assimétrico, onde $d_{ij} \neq d_{ij}$.

$$\exists h, i, j \in V: d_{ij} < d_{ih} + d_{hj} \vee tp_{ij} < tp_{ih} + tp_{hj}$$

A tabela de distâncias entre clientes, multiplicada pelo custo de euro por quilómetro (0,69€/km), está representada no anexo A.

A cada elemento do conjunto V é atribuída uma janela temporal $[a_i: b_i]$, que definem quando é que os clientes podem ser visitados. O veículo pode chegar antes do limite inferior da janela temporal e esperar, mas nunca pode chegar depois do limite superior pois invalida a entrega para aquele cliente dentro daquela janela temporal.

Uma solução para a resolução do VRPTW consiste na construção de rotas, que iniciam e terminam no armazém, onde todos os clientes são visitados por apenas um veículo sendo que as janelas temporais têm que ser cumpridas.

Todas as rotas terão início no nó 0 e término no nó $n + 1$ também. O conjunto de todos os nós, é dado pela expressão:

$$V = \{0, 1, 2, \dots, n, n + 1\}$$

Foi ainda considerado um tempo de serviço ts_i , que corresponde ao tempo que o motorista leva a efetuar a recolha no cliente i e conseqüentemente, a entrega também. À soma do tempo de percurso entre dois pontos com o tempo de serviço no cliente i , corresponde o tempo de deslocação td_{ij} .

$$td_{ij} = tp_{ij} + ts_{ij}[\text{minutos}], \text{ com } i, j \in N$$

Para os tempos de percurso tp_{ij} , foi utilizada a ferramenta *Google Maps* que tem em conta velocidades médias de cada rua, bem como trânsito no horário normal do trajeto.

A tabela de tempos de viagem entre clientes pode ser visualizada no anexo B.

Os tempos de serviço foram atribuídos arbitrariamente. Definiu-se como metade do tempo que as empresas de transportes definem para uma carga ou descarga, por isso, o valor corresponde a uma hora como tempo de serviço ts_i , como se pode ver na tabela 2.

Tabela 2 Pressupostos dos períodos de tempo de serviço

Cientes (i)	Ts(i)
Metalgalva	0min
Amiens	60min
Angers	60min
Avignon	60min
Beauvais	60min
Bourg-en-Bresse	60min
Brest	60min
Calais	60min
Clermont-Ferrand	60min
Dijon	60min
Grenoble	60min
Le Mans	60min
Paris	60min
Strasbourg	60min
Toulon	60min
Villeurbane	60min

3.3.1. Variáveis de decisão

Para a construção da formulação, considerou-se as seguintes variáveis de decisão:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o cliente } i \text{ for visitado imediatamente antes do cliente } j, \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$s_i = \text{instante de tempo em que o veículo inicia o serviço no cliente } i$$

Onde:

$$i \in V \setminus \{n + 1\}, j \in V \setminus \{0\};$$

$$s_0 = \text{instante de partida do veículo do armazém}$$

$$s_{n+1} = \text{instante de chegada do veículo ao armazém}$$

3.3.2. Função objetivo

Com esta formulação o objetivo é diminuir o custo de tonelada transportada tendo em conta a entrega da rota mais curta possível. Isto é, minimizar o tempo percorrido entre clientes diminuindo o custo associado à tonelada transportada. Aqui apenas se apresenta a variável da distância pois, ao introduzir a formulação no *CPLEX* foi multiplicado diretamente o custo de transporte pela distância.

$$\min \sum d_{ij}$$

Restrições:

Associado a esta minimização, o veículo necessita de cumprir com alguns pressupostos, ou, restrições

$$\sum_{i \in V \setminus \{n+1\}} x_{ij} = 1, \forall j \in V \setminus \{0\} \quad (1)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{0\}} x_{ij} = 1, \forall i \in V \setminus \{n + 1\} \quad (2)$$

$$s_i \geq a_i, \forall i \in V \setminus \{0, n + 1\} \quad (3)$$

$$s_i + ts_i \leq b_i, \forall i \in V \setminus \{0, n + 1\} \quad (4)$$

$$s_j \geq s_i + ts_i + tp_{i,j} + M(x_{i,j} - 1), \forall i \in V \setminus \{n + 1\}, \forall j \in V \setminus \{0\} \quad (5)$$

$$s_0 = \text{instante de partida do armazém} \quad (6)$$

$$ts_0 = 0 \quad (7)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, j \in A \quad (8)$$

$$s_i \geq 0, \forall i \in V \setminus \{n + 1\} \quad (9)$$

$$\sum_{i,j \in V \setminus \{0\}, i \neq j} u_i - u_j + n * x_{ij} \leq n - 1 \quad (10)$$

A restrição (1) garante que todos os nós, com exceção da origem, têm apenas um antecessor enquanto que a restrição (2) garante que todos os nós, exceto o nó de chegada, tem exatamente um sucessor. Assim garantimos um fluxo contínuo, sem ciclos, que inicia no nó 0 e termina no nó $n + 1$.

As restrições (3) e (4) garantem que o veículo descarrega dentro das janelas temporais definidas. A restrição (5) impõe para cada nó que, exceto a origem, o início da descarga apenas se inicia se o fim do serviço do nó imediatamente antes e o se o veículo teve tempo para se deslocar entre os nós. Uma vez que o veículo está disponível para iniciar a rota a qualquer momento, o valor de início de serviço na origem é dado pelo instante de saída do armazém (6) e com um tempo de serviço associado igual a 0 (7). A restrição (8) garante que x_{ij} apenas pode assumir valores de 0 e 1 e a restrição (9) não permite tempos negativos.

A restrição (10) evita o aparecimento de sub-rotas que condicionam a correta representação da solução final.

3.4. Resultados

Contextualizando o problema real que se verifica na empresa Metalgalva, um camião que faça a rota de distribuição do mercado francês, por norma, demora em média quinze dias a efetuar as descargas a todos os clientes. Ora, para que o estudo efetuado e os resultados se adequem ao problema real, ao invés de considerar janelas temporais individuais para cada cliente, considerou-se um espaço temporal em que se teria de satisfazer todos os clientes. Considerando os quinze clientes e que, na formulação do problema no *CPLEX*, não haveria paragens para o camião, considerou-se 3,125 dias ou, 4500 minutos. Isto permite visualizar qual a ordem ótima de descargas bem como perceber o tempo total que o veículo leva a satisfazer todos os clientes.

Ainda, considera-se que, todos os clientes são avisados previamente de que irão receber as suas encomendas. Por isso, para além de o objetivo ser de minimizar o custo do transporte, existe também o compromisso de entregar as encomendas nas datas previamente estipuladas com os clientes. Daí ser tão relevante o tempo que o veículo demora a efetuar a rota.

Foi executado o problema no *CPLEX* de forma a obter uma solução para o problema atual. A matriz resultado pode ser consultada no Anexo C.

A seguir, apresenta-se a rota a qual será efetuada pelo veículo após otimização e o tempo acumulado durante a rota:

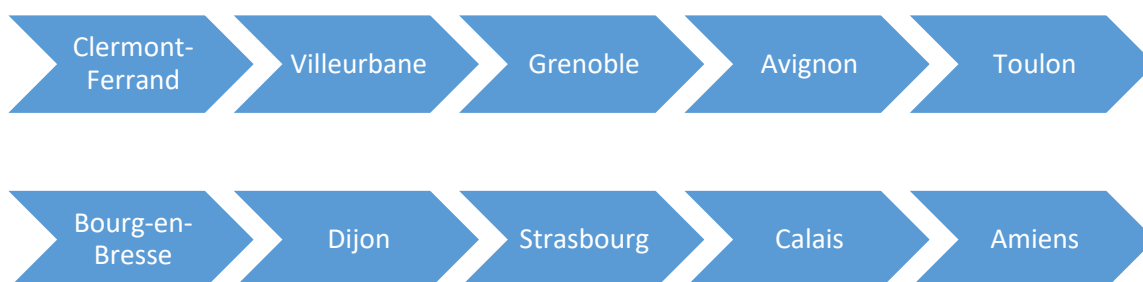




Figura 5 - Rota Otimizada

Tabela 3 Rota e tempo acumulado para o problema inicial

Ordem	Tempo acumulado
Metalogalva	0
Clermont-Ferrand	750
Villeurbane	927
Grenoble	1055
Avignon	1250
Toulon	1415
Bourg-en-Bresse	1650
Dijon	1812
Strasbourg	2089
Calais	2539
Amiens	2726
Beauvais	2833
Paris	2971
Le Mans	3167
Angers	3292
Brest	3573
Metalogalva	4440

A seguinte rota apresenta-se com um custo total de 4 284,21€ e com um tempo de viagem de 4440 minutos.

Face ao contexto real, a utilização de um método exato de forma a encontrar uma solução ótima em tempo útil é um sucesso. Primeiramente, tendo como base o custo médio por transporte no mercado francês, 6 500€, ao apresentar uma solução muito inferior ao valor médio, cerca de 35% menos e sem a margem imposta pelo fornecedor, podemos auferir que existe um intervalo confortável entre ambos os valores que possibilita suportar os custos do transporte ao colmatar com a percentagem incluída no preço de venda do produto final. Em segundo lugar, a utilização de um auxiliar para este tipo de otimizações remove a ocupação de tempo que outrora o responsável pela logística do mercado francês teria. Estima-se que cerca de 20% do tempo útil de trabalho seja despendido à otimização das rotas deste tipo de veículos. Por fim, este estudo pode levar a que seja explorado pela empresa à implementação de um software capaz de ajudar à gestão de todo o mercado francês bem como à otimização das rotas visto que se apresenta com resultados fiáveis e assertivos.

3.4.1. Análise dos Resultados

De forma a comprovar a veracidade da formulação, decidiu-se desenvolver mais 4 instâncias diferentes, igualmente com dados reais para que fosse possível comparar os dados reais. As tabelas das distâncias, já com o custo associado, para cada instância estão representadas nos Anexos D, F H e J. Os resultados de cada instância estão também representados nos Anexos E, G, I e K.

A seguir demonstra-se a rota da segunda instância:

Tabela 4 - Rota e tempo acumulado para a segunda instância

Ordem	Tempo Acumulado
Metalogalva	0
Samatan	989
Perpignan	1363
Molières-Cavaillav	1644
Nimes	2228
Le Pouzin	2505
En Brière	2894
Wittenheim	3001
Saint-Vigor-d'Ymonville	3256
Goudelin	3457
Valognes	3791
Saint-Avé	3971
Sevremoine	4269
Tulle	4434
Bergerac	4713
Auch	4883
Metalogalva	5791

Esta rota apresenta-se com um custo total de 3 987,16€ e com um tempo acumulado de 5791min. Tendo em conta o preço estimado para este veículo de 4500€, prevê-se uma poupança de 12%.

Na tabela 5 demonstra-se a rota da terceira instância:

Tabela 5 - Rota e tempo acumulado para a terceira instância

Ordem	Tempo Acumulado
Metalgalva	0
Croignon	772
Gradignan	1273
Aiffres	1669
Chateaubourg	1839
Melesse	2058
Le Rheu	2605
Bruay-la-Buissière	3034
Valeciennes	3310
Sainghin-en-Mélantois	3625
Saint-Just-en-Chaussée	3790
Colmar	4075
Gattieres	4749
Carcassonne	5085
Boulazac	5340
Roquefort	5449
Metalgalva	6440

Esta rota apresenta-se com um custo total de 3 200,22€ e com um tempo acumulado de 6440min. Tendo em conta o preço estimado para este veículo de 4000€, prevê-se uma poupança de 20%.

Na tabela 6 demonstra-se a rota da quarta instância.

Tabela 6 - Rota e tempo acumulado para a quarta instância

Ordem	Tempo Acumulado
Metalgalva	0
Brebieres	989
Trith-Saint-éger	1184
Imbsheim	1322
Saint-Just-en-Cassée	1758
Fontaine	2389
Renansart	2562
Tourcoing	2845
Loon-Plage	3012
Le Portel	3554
Domazan	3931
Le Pouzin	4491
Manosque	4904
Mauguio	5092
Billere	5356
Peyragudes	5660

Metalgalva	6440
------------	------

Esta rota apresenta-se com um custo total de 2 588,88€ e com um tempo acumulado de 6440min. Tendo em conta o preço estimado para este veículo de 4000€, prevê-se uma poupança de 35%.

Por fim, demonstra-se, na tabela 7, a quinta e última instância.

Tabela 7 - Rota e tempo acumulado para a quinta instância

Ordem	Tempo Acumulado
Metalgalva	0
Jallais	777
Joué-lès-Tours	1051
Meiesses	1367
Compiègne	1736
Goussainville	2000
Bobigny	2217
Valenton	2470
Saint-Cloud	2966
Chartres	3334
Leves	3668
Saint-André-de-l'Eure	3796
Le Petit-Quevilly	4079
Avranches	4783
Chatelaudren	4978
Saint-Jacques-de-la-Lande	5447
Metalgalva	6374

Esta rota apresenta-se com um custo total de 2 441,22€ e com um tempo acumulado de 6374min. Tendo em conta o preço estimado para este veículo de 2500€, prevê-se uma poupança de 1%.

Importante de notar que o preço apresentado para o veículo é estimado, isto porque, não é possível prever certas problemáticas que possam trazer consequências no custo final do veículo. Tal como, custos de paralisação do veículo os quais não é possível evitar. Tendo esta informação em consideração, dado a baixa diferença entre o estimado e o resultado obtido, considera-se que a segunda e última instâncias não tenham produzido resultados ótimos o suficiente para que exista uma margem para combater estes imprevistos.

No entanto, a média da percentagem de poupança é de 17% que por sua vez é um valor considerável e que poderá trazer futuras análises ao realizar o planeamento destas rotas.

4. CONCLUSÃO

Sendo o principal foco deste trabalho perceber qual a melhor rota para o problema em questão, os conhecimentos adquiridos durante o mestrado de Engenharia e Gestão Industrial tornam-se preponderantes na percepção do papel que cada variável existente nos problemas VRP, VRPTW e TSP têm na definição da rota.

É recorrente o foco das estratégias logísticas recaírem na diminuição de custos fixos, no entanto, um correto roteamento permite um maior aproveitamento dos recursos disponíveis que, por sua vez, leva a um maior controlo dos custos fixos e que permite diminuir o impacto de um mau planeamento e gestão.

De forma a implementar uma formulação capaz de ter em conta as variáveis presentes no problema em estudo, foi necessário desenvolver uma formulação matemática capaz de englobar todas as componentes e diversidades presentes num problema em que existe um vasto número de clientes com as suas respetivas janelas temporais. Um dos maiores desafios é perceber o quanto é possível reduzir o custo efetivo de um veículo que realize uma rota deste tipo. É preciso ainda o ambiente em que estes veículos se inserem de forma a simular o impacto de rotas com uma elevada complexidade e dimensão. Assim, torna-se possível delinear a melhor estratégia tendo por base uma solução previamente obtida com recurso a métodos exatos capazes de produzir resultados fidedignos.

Depois de conhecidas as variáveis do problema, foi adotada uma formulação matemática que se enquadra no problema proposto, no entanto, foram assumidos alguns pressupostos para que o resultado pudesse ser corretamente interpretado. Tal é o caso das janelas temporais para cada cliente. Tendo como premissa previamente delineada que a rota é demorada, o objetivo passa por entregar aos clientes as suas encomendas respeitando as datas de entrega anteriormente estabelecidas.

Tal como foi apresentado na análise dos resultados obtidos, as instâncias usadas como comprovativo da eficácia e eficiência do algoritmo são de extrema relevância. Os valores dos custos do veículo são baixos, tendo em consideração a elevada distância e o numeroso leque de clientes a satisfazer por cliente. Tendo apresentado uma média por veículo de 3 300,34€ face à média do custo estimado de 4 300€, é uma diferença de 100€ que por sua vez corresponde a 2%. Posto isto, as instâncias vêm comprovar a veracidade da formulação bem como a eficácia produzida por um *software* capaz de realizar planeamentos de rotas com janelas temporais.

No decorrer do tratamento dos dados foi de fácil apreensão que os dados obtidos são refletidos a poupança possível quando temos como base uma formulação adequada suportada por um

algoritmo e um *software* capaz de o executar eficazmente. Assim, o uso deste tipo de *softwares* nas tomadas de decisão, no planeamento e gestão de rotas de dimensão e complexidade elevadas torna-se evidente pelos resultados positivos e pela eficácia demonstrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cari, T., Gali, A., Fosin, J., Gold, H., & Reinholz, A. (2008). A Modelling and Optimization Framework for Real-World Vehicle Routing Problems. *Vehicle Routing Problem*. <https://doi.org/10.5772/5790>
- Chai, J., Wang, S., Wang, S., & Guo, J. (2012). Demand forecast of petroleum product consumption in the Chinese transportation industry. *Energies*, 5(3), 577–598. <https://doi.org/10.3390/en5030577>
- Comissão Europeia. (2014). *Transportes da Europa*. m, 1–20. <https://doi.org/10.2775/15111>
- Costa, J. P., Dias, J. M., & Godinho, P. (2010). *Logística*.
- de Soárez, P. C., Soares, M. O., & Novaes, H. M. D. (2014). Decision modeling for economic evaluation of health technologies. *Ciencia e Saude Coletiva*, 19(10), 4209–4222. <https://doi.org/10.1590/1413-812320141910.02402013>
- Fisher, M. (1995). Chapter 1 Vehicle routing. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 8(C), 1–33. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(05\)80105-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(05)80105-7)
- Hesse, M., & Rodrigue, J. P. (2004). The transport geography of logistics and freight distribution. *Journal of Transport Geography*, 12(3), 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.12.004>
- Ilhan, I. (2020). A population based simulated annealing algorithm for capacitated vehicle routing problem. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 28(3), 1217–1235. <https://doi.org/10.3906/elk-1902-122>
- Kherbash, O., & Liviu, M. (2015). A Review of Logistics and Transport Sector as a Factor of Globalization. *Procedia Economics and Finance*, 27(15), 42–47. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00969-7](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00969-7)
- Kumar, S. N., & Panneerselvam, R. (2012). A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants. *Intelligent Information Management*, 04(03), 66–74. <https://doi.org/10.4236/iim.2012.43010>
- Laird, J. J., Nellthorp, J., & Mackie, P. J. (2005). *Network effects and total economic impact in transport appraisal*. 12, 537–544. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.07.003>
- Liu, B. (2009). Vehicle routing problem. In *Studies in Fuzziness and Soft Computing* (Vol. 239). https://doi.org/10.1007/978-3-540-89484-1_10
- Marinakakis, Y., & Migdalas, A. (2007). Annotated bibliography in vehicle routing. *Operational Research*, 7(1), 27–46. <https://doi.org/10.1007/bf02941184>
- Moura, A. (2004). Revista Investigação Operacional. *Uma Heurística Composta Para a Determinação de Rotas Para Veículos Em Problemas Com Janelas Temporais e Entregas e Recolhas*, 45–62.
- Oliveira, J. A., Ferreira, J., Figueiredo, M., Dias, L., & Pereira, G. (2014). Sistema de Apoio à Decisão para o Transporte Não Urgente de Doentes em Veículo Partilhado. *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao*, 13, 17–33. <https://doi.org/10.4304/risti.13.17-33>
- Pečený, L., Meško, P., Kampf, R., & Gašparík, J. (2020). Optimisation in Transport and Logistic Processes. *Transportation Research Procedia*, 44(2019), 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.003>
- Tan, K. C., Lee, L. H., Zhu, Q. L., & Ou, K. (2001). Heuristic methods for vehicle routing problem

with time windows. *Artificial Intelligence in Engineering*, 15(3), 281–295.
[https://doi.org/10.1016/S0954-1810\(01\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S0954-1810(01)00005-X)

Tipologia de camiões. (n.d.). <https://www.rangel.com/pt/infohub/tipologia-de-camioes/>

ANEXO A

Tabela 4 - Custo da viagem entre o nó i e o nó j

	Metalgalva	Amiens	Angers	Avignon	Beauvais	Bourg-en-Bresse	Brest	Calais	Clermont-Ferrand	Dijon	Grenoble	Le Mans	Paris	Strasbourg	Toulon	Villeurbanne	Metalgalva
Metalgalva	0	1177	951	976	1139	1110	1121	1275	932	1118	1113	983	1080	1323	1071	1061	0
Amiens	1181	0	288	578	43	399	431	110	395	324	497	228	109	360	681	427	1181
Angers	951	288	0	565	264	399	260	353	308	380	486	66	205	536	668	415	951
Avignon	976	582	567	0	540	212	825	680	271	291	153	558	47	495	115	161	976
Beauvais	1141	46	263	540	0	360	401	148	357	281	458	208	70	397	642	388	1141
Bourg-en-Bresse	1110	402	399	212	371	0	673	493	170	110	116	409	314	286	315	52	1110
Brest	1121	430	260	825	400	673	0	495	568	593	746	273	408	740	927	675	1121
Calais	1276	109	353	678	147	493	495	0	489	393	597	293	202	428	781	527	1276
Clermont-Ferrand	932	393	309	269	353	169	567	489	0	230	190	299	29	435	372	117	932
Dijon	1172	328	380	289	292	110	593	393	230	0	208	329	235	228	393	138	1172
Grenoble	1114	501	486	152	460	115	745	600	190	329	0	477	415	395	255	72	1114
Le Mans	983	228	67	555	204	408	274	293	299	217	475	0	144	476	658	402	983
Paris	1081	110	204	476	70	297	408	204	293	228	394	144	0	339	579	325	1081

Strasbourg	1323	364	536	495	398	286	740	429	435	228	365	476	339	0	598	333	1323
Toulon	1071	620	669	115	642	313	927	781	373	393	255	659	579	597	0	263	1071
Villeurbane	1139	441	416	161	400	52	674	529	120	139	72	406	344	333	264	0	1139
Metalgalva	0	1177	951	976	1139	1110	1121	1275	932	1118	1113	983	1080	1323	1071	1061	0

ANEXO B

Tabela 5 - Tempo de viagem entre o nó *i* e o nó *j*

	Metaloga lva	Amie ns	Ange rs	Avign on	Beauv ais	Bourg-en- Bresse	Bre st	Cala is	Clermont- Ferrand	Dijo n	Greno ble	Le Mans	Par is	Strasbo urg	Toul on	Villeurb ane
Metalogalva	0	983	772	802	906	873	882	989	749	909	871	777	853	1059	843	839
Amiens	991	0	256	480	47	334	389	100	339	473	426	214	108	317	575	365
Angers	780	243	0	450	222	352	221	302	241	309	388	60	167	441	532	328
Avignon	801	482	453	0	470	193	691	565	241	255	135	475	415	436	105	153
Beauvais	889	49	236	464	0	314	409	128	340	253	397	195	78	351	548	336
Bourg-en-Bresse	857	329	352	193	319	0	573	418	159	102	113	344	268	259	281	57
Brest	867	385	221	691	398	571	0	451	490	513	641	251	369	636	774	577
Calais	984	105	314	565	135	416	461	0	430	336	516	276	194	377	656	442
Clermont-Ferrand	727	344	244	238	312	157	487	425	0	205	181	259	253	387	325	117
Dijon	899	275	307	255	263	105	523	338	204	0	189	289	211	217	344	126
Grenoble	847	431	388	135	401	110	633	499	179	288	0	411	357	351	223	68
Le Mans	759	214	65	473	195	345	262	278	258	193	416	0	141	422	553	353
Paris	835	108	176	411	77	254	376	189	251	216	336	136	0	308	489	274
Strasbourg	1047	329	441	440	361	266	648	390	387	217	336	422	308	0	521	304
Toulon	825	602	532	107	574	175	765	644	320	337	219	548	518	517	0	225
Villeurbane	908	319	335	143	344	59	578	443	120	128	68	354	292	303	225	0

ANEXO C

Tabela 6 - Instância 1

	Metalo galva	Ami ens	Ang ers	Avig non	Beau vais	Bourg-en- Bresse	Br est	Cal ais	Clermont- Ferrand	Dij on	Gren oble	Le Man s	Pa ris	Strasb ourg	Toul on	Villeu rbane	Metalo galva
Metalogalv a	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Amiens	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Angers	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Avignon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Beauvais	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Bourg-en- Bresse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Brest	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Calais	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Clermont- Ferrand	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Dijon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Grenoble	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Le Mans	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Paris	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Strasbourg	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Toulon	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Villeurbane	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Metalogalv a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ANEXO D

Tabela 7 - Custo da distância entre o nó *i* e nó *j* para a segunda instância

	Metalo galva	en brie	66000 france	sevre moine	witten heim	32000 auch	molieres-cavaillac	sam atan	saint ave	ni mes	berg erac	saint vigor dymonville	goud elin	le pouzi n	tul le	valog nes	Metalo galva
Metalogalva	0	1123	884	912	1249	696	952	714	992	945	752	1137	1076	1033	838	1137	0
en brie	1126	0	379	338	248	355	284	362	449	259	278	372	500	173	170	488	1126
66000 france	887	382	0	538	570	191	142	174	618	136	280	687	701	224	304	763	887
sevremoine	916	342	541	0	556	364	522	395	108	598	284	264	188	515	237	250	916
wittenheim	1252	252	573	560	0	659	500	666	620	442	582	455	630	355	477	561	1252
32000 auch	700	358	195	367	662	0	210	22	442	251	112	587	525	339	191	587	700
molieres-cavaillac	955	287	146	525	503	214	0	193	631	57	241	590	682	146	195	671	955
samatan	718	366	177	398	669	25	197	0	474	233	136	619	558	321	197	619	718
saint ave	995	452	621	112	623	445	635	477	0	677	363	259	85	624	376	217	995
nimes	949	262	139	602	445	255	60	237	680	0	339	611	750	88	263	716	949
bergerac	756	282	284	288	585	115	244	139	366	343	0	442	451	412	112	466	756
saint vigor dymonville	1141	375	691	267	459	591	593	622	263	614	446	0	236	526	431	130	1141

goudelin	1079	503	704	192	633	529	686	561	88	753	454	239	0	677	44 4	193	1079
le pouzin	1036	177	227	518	359	343	150	324	628	91	415	529	680	0	30 5	631	1036
tulle	841	173	308	240	481	195	199	200	380	266	116	434	448	308	0	465	841
valognes	1141	491	767	253	564	591	674	622	220	719	469	133	197	635	46 9	0	1141
Metalgalva	0	112 6	887	916	1252	700	955	718	995	949	756	1141	1079	1036	84 1	1141	0

ANEXO F

Tabela 9 - Custo da distância entre o nó i e nó j para a terceira instância

	Metalgalva	Roquefort	Croignon	Sainghin-en-Mélantois	Boulazac	Chateaubourg	Le Rheu	Gattieres	Melisse	Valeciennes	Aiffres	Carcassone	Bruay-la-Buissière	Gradignan	Saint-Just-en-Chaussée	Colmar	Metalgalva
Metalgalva	0	639	691	1229	773	1006	997	1141	1005	1219	805	812	1227	671	1141	1322	0
Roquefort	639	0	59	535	98	319	334	370	340	543	170	163	527	60	447	518	639
Croignon	691	59	0	495	72	276	266	411	286	462	130	197	481	10	388	471	691
Sainghin-en-Mélantois	1229	535	495	0	370	292	308	589	304	30	388	569	35	502	83	286	1229
Boulazac	773	98	72	370	0	262	270	370	268	424	123	161	424	77	348	342	773
Chateaubourg	1006	319	276	292	262	0	38	547	28	297	147	406	266	262	206	431	1006
Le Rheu	997	334	266	308	270	38	0	576	21	322	145	431	288	262	246	430	997
Gattieres	1141	370	411	589	370	547	576	0	554	515	449	262	548	418	489	322	1141
Melesse	1005	340	286	304	268	28	21	554	0	300	145	432	272	262	236	464	1005
Valeciennes	1219	543	462	30	424	297	322	515	300	0	350	538	46	473	61	267	1219
Aiffres	805	170	130	388	123	147	145	449	145	350	0	288	355	95	299	435	805
Carcassone	812	163	197	569	161	406	431	262	432	538	288	0	573	214	491	469	812
Bruay-la-Buissière	1227	527	481	35	424	266	288	548	272	46	355	573	0	455	76	298	1227
Gradignan	671	60	10	502	77	262	262	418	262	473	95	214	455	0	379	476	671
Saint-Just-en-Chaussée	1141	447	388	83	348	206	246	489	236	61	299	491	76	379	0	279	1141
Colmar	1322	518	471	286	342	431	430	322	464	267	435	469	298	476	279	0	1322
Metalgalva	0	639	691	1229	773	1006	997	1141	1005	1219	805	812	1227	671	1141	1322	0

ANEXO H

Tabela 11 - Custo da distância entre o nó i e nó j para a quarta instância

	Metalo galva	Le Portel	Peyrag udes	Loon- Plage	Trith- Saint- Léger	Font aine	Saint-Just- en-Chassée	Brebi eres	Bill ere	Mau guio	Rena nsart	Le Pouzi n	Imbs heim	Dom azan	Tourc oing	Mano sque	Metalo galva
Metalogalva	0	914	525	956	817	873	920	485	745	926	802	1033	785	963	836	760	0
Le Portel	914	0	39	98	179	98	77	582	580	120	470	333	540	81	579	320	914
Peyragudes	525	39	0	589	595	428	506	574	62	195	535	251	580	250	604	366	525
Loon-Plage	956	98	589	0	81	184	110	68	606	600	747	451	312	549	58	569	956
Trith-Saint-Léger	817	179	595	81	0	156	77	23	563	508	43	426	224	491	28	509	817
Fontaine	873	98	428	184	156	0	79	154	399	371	115	304	250	352	182	386	873
Saint-Just-en-Chassée	920	77	506	110	77	79	0	72	482	531	57	382	257	439	104	465	920
Brebieres	485	582	574	68	23	154	72	0	545	522	52	431	249	492	30	509	485
Billere	745	580	62	606	563	399	482	545	0	237	532	297	583	291	578	344	745
Mauguio	926	120	195	600	508	371	531	522	237	0	471	105	442	47	544	101	926
Renansart	802	470	535	747	43	115	57	52	532	471	0	387	210	446	79	460	802
Le Pouzin	1033	333	251	451	426	304	382	431	297	105	387	0	331	66	442	99	1033
Imbsheim	785	540	580	312	224	250	257	249	583	442	210	331	0	391	257	381	785
Domazan	963	81	250	549	491	352	439	492	291	47	446	66	391	0	531	68	963
Tourcoing	836	579	604	58	28	182	104	30	578	544	79	442	257	531	0	539	836
Manosque	760	320	366	569	509	386	465	509	344	101	460	99	381	68	539	0	760
Metalogalva	0	914	525	956	817	873	920	485	745	926	802	1033	785	963	836	760	0

ANEXO J

Tabela 13 - Custo da distância entre o nó *i* e nó *j* para a quinta instância

	Metalgalva	Joué-lès-Tours	Meiesses	Valenton	Chatelaudren	Bobigny	Saint-Jacques-de-la-Lande	Avranches	Goussainville	Compiègne	Saint-André-de-l'Eure	Jallais	Chartres	Saint-Cloud	Le Petit-Quevilly	Leves	Metalgalva
Metalgalva	0	846	914	837	637	836	638	687	842	876	791	658	780	816	803	764	0
Joué-lès-Tours	846	0	317	144	206	152	132	146	162	195	124	37	101	134	161	92	846
Meiesses	914	317	0	281	516	293	448	446	299	306	336	324	309	290	364	307	914
Valenton	837	144	281	0	275	12	217	192	24	54	57	176	53	12	83	56	837
Chatelaudren	637	206	516	275	0	271	73	83	275	298	213	21	226	256	208	224	637
Bobigny	836	152	293	12	271	0	222	191	12	44	55	184	52	15	78	61	836
Saint-Jacques-de-la-Lande	638	132	448	217	73	222	0	51	227	253	166	149	170	208	177	169	638
Avranches	687	146	446	192	83	191	51	0	196	219	137	169	148	180	132	150	687
Goussainville	842	162	299	24	275	12	227	196	0	32	61	19	63	23	79	66	842
Compiègne	876	195	306	54	298	44	253	219	32	0	86	226	90	61	89	106	876
Saint-André-de-l'Eure	791	124	336	57	213	55	166	137	61	86	0	161	30	49	39	40	791
Jallais	658	37	324	176	215	184	149	169	195	226	161	0	139	171	193	126	658

Chartres	780	101	309	53	226	52	170	148	63	90	30	13 9	0	43	67	7	780
Saint-Cloud	816	134	290	12	256	15	208	180	23	61	49	17 1	43	0	70	47	816
Le Petit-Quevilly	803	161	364	83	208	78	177	132	79	89	39	19 3	67	70	0	77	803
Leves	764	92	307	56	224	61	169	150	66	106	40	12 6	7	47	77	0	764
Metalgalva	0	846	914	837	637	836	638	687	842	876	791	65 8	780	816	803	76 4	0

ANEXO K

Tabela 14 - Instância 5

	Metalgalva	Joué-lès-Tours	Meiesses	Valenton	Chatelaudren	Bobigny	Saint-Jacques-de-la-Lande	Avranches	Goussainville	Compiègne	Saint-André-de-l'Eure	Jallais	Chartres	Saint-Cloud	Le Petit-Quevilly	Leves	Metalgalva
Metalgalva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Joué-lès-Tours	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Meiesses	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Valenton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Chatelaudren	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bobigny	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Saint-Jacques-de-la-Lande	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Avranches	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Goussainville	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Compiègne	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Saint-André-de-l'Eure	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Jallais	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chartres	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Saint-Cloud	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Le Petit-Quevilly	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Leves	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Metalgalva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0