



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Pedro Eduardo da Silva Correia Marques

LOCALIZAÇÃO DE BOLSAS DE ESTACIONAMENTO
PARA UM SISTEMA DE MOBILIDADE DE VEÍCULOS
AUTÓNOMOS PARTILHADOS USANDO MODELOS DE
OTIMIZAÇÃO

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de
Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação, orientada
pelo Professor Doutor João Miguel Fonseca Bigotte e pelo Doutor Gonçalo
Gonçalves Duarte Santos e apresentada ao Departamento de Engenharia
Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra

Setembro de 2022

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Pedro Eduardo da Silva Correia Marques

LOCALIZAÇÃO DE BOLSAS DE ESTACIONAMENTO PARA UM SISTEMA DE MOBILIDADE DE VEÍCULOS AUTÓNOMOS PARTILHADOS USANDO MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

LOCATION OF PARKING LOTS FOR A MOBILITY SYSTEM OF SHARED AUTOMATED VEHICLES USING OPTIMIZATION MODELS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação,
orientada pelo Professor Doutor João Miguel Fonseca Bigotte e pelo Doutor Gonçalo Gonçalves Duarte Santos.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Setembro de 2022

1 2  9 0

UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Muito obrigado a todos os que me acompanharam até este momento, nomeadamente à minha família, amigos e namorada.

De igual forma, agradeço toda a paciência, dedicação e orientação do Doutor Gonçalo Santos e do professor Doutor João Bigotte.

RESUMO

Os serviços de mobilidade partilhada fazem parte do nosso dia-a-dia. Empresas como a Uber, a Bolt ou a Lyft oferecem diversas opções tanto no que diz respeito à disponibilização de viagens em automóvel com condutor, à partilha de veículos de micromobilidade (e.g. bicicletas ou trotinetas), como na partilha do interior do veículo automóvel com outros utilizadores em simultâneo (e.g. serviços UberPool). Os veículos autónomos começam lentamente a entrar no nosso quotidiano (e.g. Tesla Autopilot) sendo expectável que a médio prazo, serviços de veículos autónomos partilhados venham fazer parte do nosso serviço de transportes (Waymo, 2020). A incorporação destes novos serviços impõe uma necessidade de estudar os seus possíveis e variados impactos na sociedade. Assim sendo, a comunidade científica tem vindo a debruçar-se sobre o tema através da aplicação de modelos de otimização e de modelos de simulação tentando avaliar a influência dos mesmos no sistema de transportes.

A presente dissertação centra-se na aplicação de dois modelos de otimização para a avaliação de um dos expectáveis impactos que a implementação de um sistema de SAV (*Shared Autonomous Vehicles*), que serve as viagens interurbanas da região, terá no ordenamento do território, em particular, na definição de bolsas de estacionamento. A análise deste impacto incidirá sobre a Região de Coimbra (NUTS III) e tem como objetivo definir, de forma estratégica (adequada a um estudo prévio), a localização e capacidade de bolsas de estacionamento para um sistema de veículos autónomos elétricos partilhados.

Verificou-se que, tendo em conta o sistema proposto na referida região, a necessidade de lugares de estacionamento a implantar em cada município é elevada, nomeadamente para o município de Coimbra em período diurno. Este último centraliza uma grande porção dos destinos das viagens de ida interurbanas realizadas em regime pendular. Esta necessidade encontra-se dependente da tipologia de serviço considerada. Para serviços SAV com partilha do interior do veículo (até 4 passageiros por veículo) existe uma diminuição considerável na necessidade de lugares de estacionamento, quando comparado com um serviço SAV sem partilha (um passageiro por veículo).

O trabalho desenvolvido insere-se no projeto de investigação Driving2Driverless que tem como desafio o estudo de um possível futuro da mobilidade com sistemas de veículos autónomos elétricos partilhados.

ABSTRACT

Shared mobility services are part of our daily life. Companies such as Uber, Bolt or Lyft offer several options, both in terms of providing car trips with a driver, sharing micro mobility vehicles (e.g. bicycles or scooters), and sharing the inside of the vehicle simultaneously with other users (e.g. UberPool services). Autonomous vehicles are slowly taking part of our lives (e.g. Tesla Autopilot) and it is expected that shared autonomous vehicle services will become part of our transport service (Waymo, 2020). The incorporation of these new services increases the need to study its impacts and therefore, the scientific community has been focusing on the subject by applying optimization models and simulation models, trying to evaluate the influence on the transport system.

This dissertation focuses on the application of two optimization models for the evaluation of one of the expected impacts that the implementation of a SAV (Shared Autonomous Vehicles) system which serves interurban trips in the region, will have on land use, which is, parking. This analysis will focus on the Coimbra Region (NUTS III) and aims to define, in a strategic way (suitable for a preliminary study), the location and capacity of parking lots for a shared electric autonomous vehicle system.

The results showed that, considering the proposed system in that region, the need for parking spaces to be implemented in each municipality is high, mainly for the municipality of Coimbra during daytime. The latter collects a large portion of the destinations for intercity one-way trips carried out by commuter. This need is dependent on the type of service considered. For SAV services in which the inside of a vehicle is shared (up to 4 passengers per vehicle) there is a considerable decrease in the need for parking spaces when compared to a SAV service with no sharing (one passenger per vehicle).

This work is part of the Driving2Driverless research project which is aimed to study a possible future of mobility with shared electric autonomous vehicle systems.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos e motivações	7
1.2. Estrutura da dissertação	8
2. REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1. Mobilidade partilhada	9
2.2. Veículos autónomos.....	11
2.3. Sistemas de veículos autónomos partilhados SAV	13
2.4. Problemas de localização de equipamentos	15
2.5. Modelo p-mediana	16
3. METODOLOGIA	18
3.1. Considerações iniciais.....	18
3.2. Fluxograma	19
3.3. Modelo P-Mediana Dinâmico.....	22
3.4. Modelo de Custos Fixos	24
3.5. Definição de Procura	28

3.6. Definição dos custos para o modelo de custos fixos	30
3.7. Dimensionamento dos pontos de carregamento a serem integrados nas bolsas de estacionamento	30
4. ESTUDO DE CASO	32
4.1. Cenário A – cada veículo transporta uma só pessoa.....	36
4.2. Cenário B – cada veículo transporta no máximo 4 pessoas.....	41
4.3. Definição do número de pontos de carregamento de baterias	44
5. RESULTADOS	46
6. CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Modelo de Ripple	13
Figura 3.1 – Fluxograma do trabalho desenvolvido.	21
Figura 3.2 - Volume acumulado de veículos parados e de viagens ao longo do dia.	29
Figura 4.1 - Região de Coimbra.	33
Figura 4.2 - Volume de veículos parados ao longo de um dia por município.	36
Figura 4.3 – Coimbra vs. Restantes municípios.	37
Figura 4.4 - Volume de veículos parados em cada centro entre as 9h e as 19h.	38
Figura 4.5 – Volume máximo de veículos parados em cada centro entre as 19h e as 9h.	38
Figura 4.6 - Volume máximo diário para cada centro.	40
Figura 4.7 - Volume acumulado de veículos parados ao longo do dia.	41
Figura 4.8 - Volume de veículos parados em cada centro entre as 9h e as 19h.	42
Figura 4.9 - Volume de veículos parados em cada centro entre as 19h e as 9h.	43
Figura 4.10 - Volumes máximos diários de veículos parados.	43
Figura 5.1 - Representação esquemática da solução ótima para o caso 7: período diurno.	48
Figura 5.2 - Representação esquemática da solução ótima para o caso 7: período noturno.	49
Figura 5.3 - Localização e número de carregadores para os parques no período noturno.	49
Figura 5.4 - Representação esquemática da solução ótima para o caso 1: período diurno	51
Figura 5.5 – Localização e número de carregadores para os parques no período noturno.	52
Figura 5.6 - Representação esquemática da solução ótima para o caso 1: período noturno.	52
Figura 5.7 - Representação esquemática da solução ótima para o caso 5	54
Figura 5.8 - Localização e número de carregadores para Cenário A do Caso 5 do modelo de custos.	55
Figura 5.9 - Representação esquemática da solução ótima para o caso 5	56
Figura 5.10 - Localização e número de carregadores para Cenário B do Caso 5 do modelo de custos	57

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Fluxos iniciais	29
Quadro 3.2 - Fluxos condensados	29
Quadro 4.1 – Casos analisados nos cenários A e B para o modelo p-mediana	35
Quadro 4.2 – Casos analisados nos cenários A e B para o modelo de custos fixos	35
Quadro 4.3 - Razão de preços para a região de Coimbra.	39
Quadro 4.4 – Tempo total de movimento dos veículos do sistema SAV	44
Quadro 4.5 - Tempo total em movimento por veículo	44
Quadro 4.6 - Distância percorrida por veículo.	45
Quadro 4.7 - Número de veículos a serem carregados	45
Quadro 5.1 - Resultados para o modelo p-mediana no cenário A	47
Quadro 5.2 - Resultados para o Caso 7 do modelo p-mediana no cenário A	47
Quadro 5.3 - Resultados para o modelo p-mediana no cenário B	50
Quadro 5.4 - Resultados para o Caso 1 do modelo p-mediana no cenário B.	51
Quadro 5.5 - Resultados para o modelo de custos no Cenário A.	53
Quadro 5.6 - Resultados para o Caso 5 do modelo de custos no Cenário A.	54
Quadro 5.7 - Resultados para o modelo de custos no Cenário B.	55

1. INTRODUÇÃO

O surgimento da pandemia de COVID-19 no mundo pôs em causa aquilo que por nós é tido como um direito fundamental, a nossa mobilidade, ou seja, a possibilidade de nos deslocarmos. O desafio ao longo deste ano e meio, pela primeira vez, foi testar a nossa capacidade de não nos movimentarmos, tendo como pano de fundo a proteção da saúde pública a nível nacional e mundial. Recordamos que os impactos das imposições governamentais, relativos à limitação da mobilidade, para o controlo da pandemia, trouxe graves consequências ao nível dos transportes. A ICAO (Organização da aviação civil internacional) revela que a nível mundial em 2020, voaram menos 2.6 mil milhões de pessoas em relação ao ano anterior traduzindo-se assim em perdas de cerca de 371 mil milhões de dólares para as companhias aéreas (International Civil Aviation, 2021). Num contexto mais próximo é revelado que a procura por transportes públicos em Portugal decresceu cerca de 56% entre Março e Dezembro de 2020 (TSF, 2021). Apesar de tudo, a recuperação é iminente e a “reconquista” da mobilidade sem qualquer restrição não é mais uma luz ao fundo do túnel, mas sim uma realidade.

Num mundo que se começa a reerguer, a necessidade intrínseca das pessoas se voltarem a relacionar fisicamente é natural e aliada vem também a vontade da partilha. Convenha-se que a ideia de partilha não se fechou totalmente durante este tempo, mas as limitações foram óbvias. Através de um ecrã lutámos diariamente contra aquilo que nos separou, partilhando o nosso dia-a-dia, à distância.

Agora, com o regresso da “quase” normalidade, enfrentamos novos desafios e retomamos outros, e, neste caso, podemos dizer que a mobilidade também. A designada “Mobilidade Partilhada” é o uso partilhado de um automóvel, bicicleta ou outro veículo de baixa velocidade que permite aos utilizadores o acesso de curto prazo a um modo de transporte numa base de “necessidade” (Shaheen et al., 2015). No seguimento da definição de mobilidade partilhada considera-se a existência de duas grandes vertentes para a distinção dos serviços existentes, a partilha de veículos e a partilha de viagens. No primeiro temos como exemplo os serviços de *carsharing*, nos quais os utilizadores aproveitam os benefícios do uso de um veículo privado sem os custos associados à sua propriedade. Relativamente à partilha de viagens temos dois grandes tipos de serviços: os serviços de

ridesharing no qual se inclui o *carpooling*; e os *on-demand ride services* onde se inclui o *ride-hailing* (Shaheen et al., 2017).

Carpooling é uma forma de partilha de viagem na qual o condutor partilha o interior do seu veículo privado com outros passageiros. Este tipo de serviço reduz o número de automóveis necessários pelos viajantes, está normalmente associado a grandes benefícios sociais como por exemplo a redução do consumo de energia e emissões, mitigação do congestionamento rodoviário e redução da procura por estacionamento (Cohen & Shaheen, 2016), por outro lado, poderá ser considerada uma alternativa um pouco desinteressante tendo em conta a os tempos de viagem e a flexibilidade do serviço (Santos & Correia, 2021)

Serviços de *ride-hailing* são serviços nos quais os passageiros utilizam aplicações moveis para se conectarem com motoristas e deste modo alugarem viagens. Estes serviços são atualmente oferecidos por empresas, como por exemplo a Uber ou a Bolt, e distinguem-se em grande parte pelo facto de que os veículos em questão não pertencem às empresas, mas sim aos próprios motoristas. O uso destes serviços tem crescido ano após ano e convém-se que as principais razões para este fenómeno são os seus baixos preços, os reduzidos tempos de espera e a facilidade com que qualquer utilizador consegue ter acesso ao serviço em causa (Cohen & Shaheen, 2016).

Apesar de ambos os modelos apresentarem soluções no que diz respeito à partilha de viagens e à mobilidade partilhada na sua generalidade, compreende-se que cada modelo de negócio associado se desenvolve em cenários próprios. Empresas de *carpooling* procuram países ou regiões que tenham uma densa rede viária, enquanto serviços de *ride-hailing* procuram áreas urbanas (Hasselwander et al., 2022). De uma forma geral a tendência é para que estes serviços continuem a crescer e possivelmente, a certa altura, comecem a convergir para um só.

Com o avanço tecnológico observado nestes últimos anos é possível atualmente perspetivar a conceção de um novo tipo de serviço. A introdução de veículos autónomos nos sistemas de mobilidade partilhada é alvo de grande atenção por parte da comunidade e a cada ano que passa verificamos que veículos autónomos não são mais um conceito, mas sim uma realidade. Veja-se o exemplo da Tesla com o seu sistema autopilot (Tesla, 2017).

Veículos autónomos são amplamente definidos como veículos que, transportando passageiros ou mercadorias, têm algum nível de automação com o objetivo de assistir ou substituir o controlo humano (Stocker & Shaheen, 2017). Apesar da definição apresentada, este conceito tende a ser pouco claro. É recomendado que o conceito de autonomia seja associado à condução e não ao veículo. Autonomia é um termo usado há já bastante tempo e representa, em áreas como a robótica

e a inteligência artificial, a capacidade de os sistemas tomarem decisões independentes e autossuficientes. A generalização do termo leva à questão de se realmente um veículo autónomo depende da comunicação e cooperação com entidades independentes para a realização das suas tarefas. De modo a clarificar, são apresentados e definidos 6 níveis de veículos que têm a sua condução automatizada (SAE International, 2018):

Nível 0 – O condutor tem controlo sobre toda a dinâmica da condução;

Nível 1 – O veículo é totalmente controlado pelo condutor, mas, no entanto, poderá haver funções de assistência à condução;

Nível 2 – O veículo tem uma variedade de funções que podem ser automatizadas, como a aceleração e a direção, mas o condutor continua a necessitar de estar envolvido com a função da condução e monitorizar o ambiente envolvente em todas as alturas;

Nível 3 – O condutor é uma necessidade, mas deixa de ser necessária a monitorização do ambiente. De qualquer forma, deverá estar consciente que se necessário, e em qualquer altura, poderá ser precisa a sua intervenção e assumir controlo do veículo;

Nível 4 – O veículo é capaz de assumir todas as funções da condução, sob certas condições, e a condução humana passa a ser uma opção;

Nível 5 – O veículo tem capacidade de assumir todas as funções de condução, em qualquer cenário.

No cenário atual, verifica-se que em circulação apenas temos veículos com o nível 4 de condução automatizada como por exemplo os veículos pertencentes a um sistema de táxis funcionando em Phoenix, Arizona da empresa Waymo (Waymo, 2020) ou até um autocarro que opera junto à Nova SBE ligando a universidade a Cascais (Insider, 2019). Relativamente ao uso privado este tipo de veículos só atinge até ao momento o nível 3, tendo como um dos representantes principais os veículos da empresa Tesla (Tesla, 2017).

O conceito de veículo autónomo, apesar da complexidade inerente ao termo, tem oportunidade de trazer grandes benefícios no que diz respeito à segurança, ao desempenho do tráfego, estacionamento e conseqüentemente abrir novas oportunidades de negócio (Hussain & Zeadally, 2019).

A introdução de veículos autónomos no que diz respeito ao seu uso generalizado é hoje avaliada tendo em conta os seus possíveis custos e benefícios.

Compreende-se que um dos assuntos mais discutidos é a segurança. A expectativa inicial de aumento de segurança com a implementação dos veículos autónomos é hoje menos certa e a dualidade de opiniões é evidente. O erro humano contribui em cerca de 90% relativamente a acidentes rodoviários (Litman, 2020), e de um ponto de vista muito simples poderemos pensar que o facto de introduzirmos carros sem condutor eliminará esse erro e, assim sendo, será possível reduzir os acidentes nesse valor.

A verdade é que com o uso corrente de veículos autónomos novos riscos emergem sendo necessário uma ponderação dos mesmos. Falhas no hardware e software dos veículos, *hacking* e custos elevados de reparação têm agora uma nova e maior importância. De uma forma não relativa ao veículo, o possível aumento de comportamentos de risco por parte dos passageiros e redução de investimento em estratégias de segurança convencionais são também outros riscos a ter em conta (Litman, 2020).

Aliada à segurança rodoviária estão também questões éticas a serem respondidas no que diz respeito à aceitação destes veículos. Compreende-se que é ainda complicado definir completamente qual deverá ser a resposta do veículo em situações de extremos dilemas, como por exemplo a escolha inevitável entre uma vida humana e outra, e que de certa forma a decisão em situações como esta não é algo que possa ser programada com base em dados estatísticos ou demográficos sem que se levantem dúvidas éticas no que diz respeito à decisão tomada por um sistema autónomo (BMVI, 2017). No entanto, entende-se a necessidade de tentar diminuir a eventualidade de uma situação dramática, e assim sendo medidas devem ser tomadas no que diz respeito à qualidade de infraestruturas rodoviárias de forma a prevenir quaisquer desastres e para também transmitir aos possíveis utilizadores mais reticentes destes veículos, a confiança necessária à sua aceitação e consequente implementação (Liljamo et al., 2018).

No seguimento dos parágrafos anteriores, verifica-se que a segurança oferecida por um carro autónomo é um fator chave para a aprovação destes veículos no nosso trânsito, no entanto, na eventualidade de haver um acidente a quem deverão ser imputadas responsabilidades? Por um lado, a autonomia completa de um veículo implica necessariamente o não controlo do veículo pelos utilizadores e nessa perspectiva o usuário do veículo nunca seria alvo de culpa por um possível acidente, no entanto, mais perspectivas devem ser analisadas. Havendo falha de manutenção do hardware e software do veículo, deverá ser atribuída a culpa ao proprietário do veículo, que não cuidou do mesmo, ou o próprio veículo deverá ter capacidade para tomar decisões próprias de modo a estar sempre conforme as normas de segurança? (Hussain & Zeadally, 2019). De facto algumas dessas questões já estão a ser respondidas e a verdade é que a consideração de todas as

responsabilidades que antigamente seriam apenas imputadas ao condutor deverão ser agora passadas para os fabricantes e operadores dos sistemas tecnológicos e também para as entidades responsáveis pela infraestruturas (BMVI, 2017).

Outro dos impactos previsíveis de grande relevância é a melhoria nas condições de trânsito. De forma geral a utilização de veículos autónomos poderá aumentar o número de ocupantes por veículo e conseqüentemente diminuir o tráfego rodoviário, melhorando as condições de circulação. Aliado, poder-se-á prever que veículos autónomos (AVs) terão capacidade executar as melhores rotas de uma dada viagem podendo assim levar a uma maior eficiência de consumo energético (Hussain & Zeadally, 2019). Considerando que um AV será tecnologicamente suficiente para tomar as suas próprias decisões e que a segurança dos passageiros será primordial será de esperar uma diminuição nas colisões (Tayarani et al., 2018).

A poluição é também um dos fatores no qual se prevê uma melhoria substancial, mas não obstante a dualidade de opiniões também existe. Em primeiro lugar, teremos de ter em conta que um AV tanto poderá ser alimentado a energia elétrica ou a combustíveis fósseis e assim sendo essa melhoria poderá não ser tão evidente caso os AVs consumam combustíveis fósseis. Por outro lado, apesar da óbvia melhoria no que diz respeito à poluição do ar devido à diminuição de emissões, caso os veículos sejam elétricos, teremos de ter em consideração que uma grande porção da energia elétrica produzida é atualmente resultante da queima de combustíveis fósseis. De igual forma, AVs emitem também partículas relacionados com o desgaste da estrada, dos travões e dos próprios pneus (Litman, 2020).

Não só estes três grandes fatores são avaliados aquando da consideração do uso de AVs mas também se levantam questões como impacto na equidade social, viabilidade devido aos custos financeiros associados e onde deve ser localizado o seu estacionamento.

Todos estes fatores, como já referido, sofrem de vários tipos de análise e de perspectiva e a verdade é que só no futuro poderemos saber quais serão os reais efeitos da introdução generalizada de AVs no dia-a-dia.

Como atrás referido, o uso de AVs trará novas oportunidades negócio e dentro destas oportunidades de negócio encontra-se o serviço de transporte baseado num sistema de veículos autónomos partilhados (SAV). Este sistema disponibiliza uma frota de veículos autónomos que podem ser utilizados em regime *on-demand* ou *reservation-based*, de acordo com as necessidades dos seus utilizadores (Narayanan et al., 2020).

À luz destes conceitos e a par do desenvolvimento tecnológico, veículos autónomos partilhados têm oportunidade de contribuir para um aumento da mobilidade, por exemplo, em termos de quilómetros percorridos por veículo ou grupos de procura servidos, e na melhoria dos sistemas de transporte, através da redução do número de veículos em uso e conseqüente redução das emissões (Narayanan et al., 2020). No entanto, a condução autónoma é ainda alvo de avaliação por parte dos académicos no que diz respeito aos efeitos que terá na mobilidade e na sociedade.

Os sistemas de transportes que incluem SAV são inerentemente complexos e assim sendo existem várias componentes envolvidas nas suas modelações. Estas componentes ditam a implementação destes sistemas e a sua avaliação, sendo as principais: a definição de procura, dimensionamento da frota, atribuição de tráfego, atribuição de veículos, redistribuição de veículos, preço, carregamento e estacionamento (Narayanan et al., 2020).

Focando-nos na componente sobre a qual reside este trabalho, o “estacionamento”, temos em mente que 95% do tempo de vida de um veículo é passado no seu lugar de estacionamento (Mitchell, 2015). No entanto, quando se trata de um sistema SAV o valor apresentado pode ser significativamente reduzido. Num estudo no qual é proposto o dimensionamento de um sistema de veículos autónomos partilhados interurbano verifica-se que, na condição na qual a procura é 100% satisfeita apenas por um sistema deste tipo é possível reduzir a percentagem de tempo parado para cerca de 65.9% (Santos & Correia, 2021)

A diminuição da pegada do estacionamento é um pensamento já existente na indústria dos veículos autónomos, sendo uma solução viável a possibilidade de converter os parques de estacionamento tradicionais em parques de estacionamento para veículos autónomos, que podem acolher um maior número de veículos numa menor área (redução do espaço de circulação e do espaço entre veículos). Intrinsecamente, o comportamento em relação ao estacionamento é afetado pelo facto de os veículos serem autónomos, isto é, a capacidade de um veículo se estacionar a si próprio leva conseqüentemente à desnecessidade de proximidade entre condutor e veículo e abrindo então a possibilidade de despachar o veículo para parques de estacionamento menos congestionados independentemente da sua distância em relação ao utilizador (Nourinejad et al., 2018).

No entanto, estudos existem onde não se vislumbra uma vantagem óbvia na introdução de veículos autónomos partilhados no tema do uso do solo. O aumento da capacidade em relação ao estacionamento, é previsível devido ao aumento da mobilidade e da eficiência dos transportes públicos quando estes são complementados com SAV, e apenas cenários nos quais SAV têm uma adoção próxima dos 100%, revelam benefícios, ou seja, diminuição do estacionamento tanto na rua como fora dela entre 84% a 94% (Mitchell, 2015).

1.1. Objetivos e motivações

A completa integração dos SAV na mobilidade poderá trazer melhorias na acessibilidade, principalmente para pessoas residentes em áreas mais afastadas dos grandes centros. A mobilidade interurbana toma assim a devida importância no estudo aqui desenvolvido. Como tal, é necessário dar início ao estudo das componentes que diretamente terão impacto na modelação destes sistemas de mobilidade partilhada.

Qual será a imagem regional da distribuição de parques de estacionamento tendo em vista a implantação de um sistema SAV? O estudo presente nesta dissertação pretende dar um passo inicial naquilo que se prevê como um aumento no movimento interurbano, com a integração de SAV. Este tem como objetivo definir, de forma estratégica e adequada a um estudo prévio, a localização e capacidade de bolsas de estacionamento para um sistema de veículos autónomos elétricos partilhados, inseridos num sistema de mobilidade partilhada interurbano na região de Coimbra.

A metodologia usada baseia-se na aplicação de modelos de localização de equipamentos, os quais incidirão sobre dois fatores de grande importância para a mobilidade interurbana: a acessibilidade, a qual é caracterizada através da distância entre utilizadores e SAVs e o fator económico, avaliado pelos custos inerentes à utilização dos SAVs.

O projeto de investigação Driving2Driverless (PTDC/ECI-TRA/31923/2017) contribui com dados, que resultam de estudos já realizados, para o trabalho aqui desenvolvido. Isto demonstra que o tema acerca do futuro da mobilidade com sistemas de veículos autónomos elétricos partilhados é já alvo de variados estudos caminhando assim para uma melhor compreensão e previsão daquilo que nos poderá esperar.

1.2. Estrutura da dissertação

A presente dissertação compõe-se ao longo de seis capítulos.

Damos início ao trabalho através do capítulo número um, Introdução, onde se enquadra o estudo realizado e se apresentam os objetivos do mesmo.

De seguida, no capítulo número dois, é apresentada a revisão bibliográfica daqueles que foram os trabalhos com maior relevo para o desenvolvimento deste estudo.

No terceiro capítulo, descreve-se a metodologia utilizada. Este inclui uma análise dos diferentes métodos e respetivos parâmetros usados na localização e dimensionamento das bolsas de estacionamento.

O quarto capítulo destina-se à apresentação do estudo de caso sobre o qual se desenvolve o método de análise descrito no capítulo 3.

O quinto e o sexto capítulo são, respetivamente, análise de resultados e conclusão.

2. REVISÃO DE LITERATURA

No presente capítulo serão referenciados todos autores e respetivas publicações que tiveram relevante interesse no entendimento de conceitos e que compõe o estado atual da literatura tendo em vista o desenvolvimento do estudo em causa e a sua necessidade.

2.1. Mobilidade partilhada

Em Shaheen *et al* (2017) consideram-se três fatores chave para a caracterização da mobilidade partilhada, a partilha de veículos, a partilha de viagens e partilha de serviços de entrega. Quando nos referimos à partilha de um veículo falamos dos serviços de partilha de carros (*Carsharing*), partilha de scooters (*Scooter Sharing*) e de partilha de bicicletas (*Bikesharing*). Partilha de viagens definem-se pela partilha da mesma com outros passageiros (*Ridesharing*), pelos serviços de procura de viagens (*On-demand ride services*) e por microtrânsito (*Microtransit*). Por último temos uma rede de serviços de correio que define a partilha de um serviço de entregas.

Carsharing é um serviço no qual o utilizador tem os benefícios do uso de um veículo privado, mas não comporta os custos de propriedade do mesmo. Este tipo de serviço desdobra-se em 3 diferentes modelos de negócio: um modelo de “ida e volta” (*Roundtrip*), ou seja, o utilizador terá acesso a veículos partilhados numa base horária e tem a obrigação de devolver o veículo ao sítio onde foi recolhido; um modelo de ida (*One-way*) no qual ao contrário do modelo anterior, não existe a necessidade de devolver o veículo ao ponto inicial; por último um modelo de partilha de veículos privados (*peer-to-peer*), onde um particular disponibiliza o seu automóvel a um utilizador do serviço (Stocker & Shaheen, 2017).

Scooter Sharing e *bikesharing* são os dois outros modelos de serviços de partilhas de veículos que em regra geral têm um modelo de negócio semelhante ao do *carsharing*, mas que se distinguem pelas suas óbvias diferenças. No que diz respeito a *Scooter Sharing* temos um serviço de partilha

de trotinetas que devido às suas baixas velocidades e à menor necessidade de espaço de estacionamento. é um serviço preferencialmente destinado ao centro urbano (Shaheen & Cohen, 2019).

Bikesharing pode ser composto por um serviço público de partilha de bicicletas, onde qualquer pessoa pode ter acesso ao veículo por um certo custo, ou por um serviço de partilha de bicicletas dentro de um polo, podendo ser um polo universitário ou um centro empresarial, onde o acesso é exclusivo à comunidade em qual está inserido. De outro modo existem também serviços *peer-to-peer* onde um particular poderá disponibilizar a sua bicicleta para aluguer (Shaheen & Cohen, 2019)

Os serviços de partilha de viagens, denominados por *ridesharing*, têm tradicionalmente como objetivo permitir a partilha de viagens entre passageiros e condutores com o mesmo par origem-destino. Os serviços mais clássicos desta modalidade são o *carpooling* e o *vanpooling* (Shaheen & Cohen, 2019).

On-demand ride services consistem em serviços que se distinguem do *ridesharing* pelo facto de ser necessário o passageiro efetuar um pedido de viagem através do uso do telemóvel ou de uma aplicação. Escrutinando estes serviços temos o *ridesourcing*, no qual se utiliza uma aplicação do telemóvel para fazer a ligação entre passageiro e condutor; o *ridesplitting*, que não é mais do que uma variação do *ridesourcing* no sentido em que neste existe a partilha de uma viagem entre passageiros que têm o mesmo destino utilizando também uma aplicação móvel; e os serviços “*E-Hail*” que não são mais do que a partilha de um serviço de táxis (Shaheen & Cohen, 2019).

Por último temos os serviços de *microtransit* que se caracterizam como uma solução para o transporte no setor privado, usando miniautocarros ou carrinhas de passageiros. Estes podem incluir rotas fixas ou flexíveis como também um serviço de horário fixo ou variável consoante a procura (Shaheen & Cohen, 2019).

Acerca do terceiro fator chave referido temos os serviços partilhados de correio, os quais podem ser distinguidos em *P2P Delivery Services* e *Paired On-Demand Passenger Ride and Courier Services*. O primeiro modelo implica o uso de um veículo privado por parte do transportador para efetuar uma entrega e o segundo modelo tem como base o uso de um serviço de transporte de passageiros que também terá disponível a modalidade de transporte de encomendas (Shaheen et al., 2017).

Os impactos da mobilidade partilhada são diversos e cada serviço tem uma área de impacto, no entanto verifica-se bastante similaridade entre eles. No que diz respeito ao *carsharing* os principais impactos serão no número de venda de veículos, no aumento de modos de transporte alternativos, na redução do número de quilómetros percorridos por veículo, aumento do acesso à mobilidade por pessoas sem veículos, redução do consumo de combustível e emissões de gases que contribuem para o efeito estufa e uma maior consciencialização para o meio ambiente. Constata-se que a nível do planeamento urbano a mobilidade partilhada terá o seu papel e a previsão dos seus impactos têm de ser considerados. Desse modo aconselha-se que se tenha em consideração: a compreensão das tendências sociodemográficas nos impactos nas cidades e regiões, a maximização da capacidade das infraestruturas minimizando a distância percorrida por veículos, a diminuição do congestionamento, a redução da procura por estacionamento e o aumento da consciencialização sobre o meio ambiente (Shaheen & Cohen, 2019).

2.2. Veículos autónomos

A primeira ideia de veículo autónomo surge nos anos 20 pelo nome de Phantom Auto. O projeto nascido nos Estados Unidos teve como conceito a condução de um carro através de controlo remoto feito a partir de um carro de apoio que seguiria atrás do carro a ser controlado ou possivelmente através de um avião que voaria a baixas alturas (Theatlantic@, 2021).

De seguida, em 1977, no Japão, é apresentado um novo protótipo de veículo autónomo. Pela mão da Tsukuba Mechanical Engineering Laboratory é criado um carro que é capaz de se guiar por linhas brancas marcadas numa pista de teste até uma velocidade de 30Km/h.

Na década de 80 verifica-se um significativo avanço no que diz respeito à condução autónoma começando por Ernst Dickmanns na Universidade de Bundeswehr em Munique. Neste projeto o carro desenvolvido foi capaz de atingir velocidades de 96 Km/h em estradas sem tráfego (Forrest & Konca, 2007).

Paralelamente, o projeto Prometheus lançado em 1986 culminou ao fim de 9 anos na criação do veículo autónomo Mercedes Classe S. Este veículo completou uma viagem de 1758Km, desde Munique a Copenhaga, tendo feito 158Km sem intervenção humana, atingido velocidades superiores a 175Km/h e efetuando manobras de ultrapassagem. O projeto foi um trabalho da organização europeia de investigação Eureka, sendo apoiado por fabricantes de automóveis,

fornecedores e organizações académicas, no qual esteve envolvido mais uma vez o professor Ernst Dickmanns, trabalhando em proximidade com a Mercedes-Benz (Forrest & Konca, 2007).

Definida como uma grande conquista na história dos veículos autónomos, em 1995, completou-se a maior viagem feita por um veículo deste género nos Estados Unidos. Foram 4585Km desde Pittsburgh, Pensilvânia até San Diego na Califórnia, dos quais 4501Km foram feitos sem intervenção humana a uma velocidade média de 102,3Km/h. O veículo utilizado para este feito pertence à *The Carnegie Mellon University Navigation Laboratory*, grupo especializado na construção de veículos autónomos (Kistangari et al., 2017).

A corrida pela implementação de veículos autónomos no dia-a-dia é já uma pequena realidade. Empresas como a Tesla apresentam-se no mercado automóvel dando ao público a possibilidade de usarem uma aplicação (*Autopilot*) que torna os seus veículos elétricos em autónomos ou como a Google que apesar de não ter disponível os seus carros para comercialização apresenta-nos o Waymo, um veículo completamente autónomo que em cidades como Phoenix e São Francisco incorporam o primeiro serviço de *ride-hailing* de veículos deste género (Waymo, 2020).

A implementação da condução autónoma na mobilidade e respetivas implicações leva à consideração de quais serão as potenciais mudanças na sociedade (Milakis et al., 2017). Na Figura 2.1 é apresentado um modelo de Ripple que não é mais do que um esquema amplamente usado para descrever possíveis propagações do efeito de um determinado evento em vários campos da sociedade.

Definindo como o centro do modelo a condução autónoma são definidos três níveis de implicações com os respetivos efeitos, propagando-se nível a nível de uma forma mais abrangente. Como é possível verificar as implicações de primeira ordem serão o custo de viagem, tráfego e escolha de viagem. Na segunda ordem encontram-se as implicações veiculares, infraestruturais e de uso de solo (Narayanan et al., 2020).

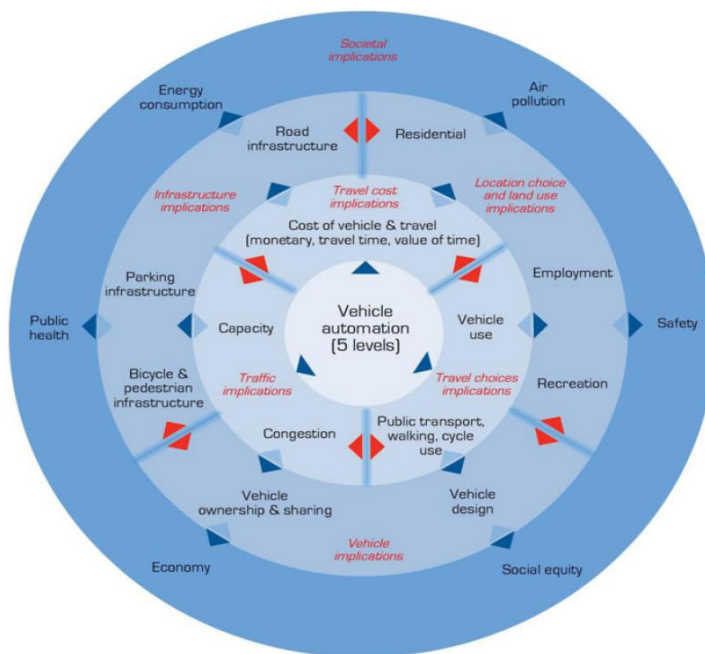


Figura 2.1 - Modelo de Ripple

Por último definem-se as implicações sociais, traduzindo efeitos, como por exemplo, a nível económico e de segurança. Todos os efeitos associados a cada nível são escrutinados consoante a bibliografia existente, verificando-se que avaliação da negatividade ou positividade de cada efeito não está concretamente definida (Narayanan et al., 2020).

2.3. Sistemas de veículos autónomos partilhados SAV

Com o avanço da tecnologia relativa aos veículos autónomos e o crescimento da mobilidade partilhada poderão criar-se alternativas ao transporte convencional, sendo uma delas um sistema de veículos autónomos partilhados.

Com o objetivo de estudar a literatura existente Narayanan et al. (2020) propõe um esquema no qual identifica que os trabalhos relativos aos sistemas de veículos autónomos partilhados são principalmente apresentados com base na sua operacionalidade ou tendo em conta o nível de integração com outros modos de transporte. Tendo como referência um sistema baseado em

marcações (*booking type*) os serviços podem ser classificados como *on-demand*, serviço que se define pela procura de um veículo em tempo real ou em *reservation-based*, consistindo em reservas antecipadas.

A utilização de veículos autónomos poderá levar a uma convergência na definição dos serviços existentes de mobilidade partilhada a partir do momento em que a necessidade de condutor deixa de ser necessária. No entanto, por definição, em serviços de *ride-sharing*, dois ou mais utilizadores partilham o carro ao mesmo tempo sendo que o pedido é feito apenas por uma pessoa. No caso de *carsharing*, são analisados dois tipos de sistemas *de ride-sharing* dinâmico, sendo eles: origem-destino dinâmico e *en-route* dinâmico. No primeiro, as pessoas que partilham o mesmo par origem-destino são agrupadas na mesma viagem e, no segundo, utilizadores com diferentes origens ou destinos poderão partilhar o interior do mesmo veículo. No que diz respeito a um sistema misto (*mixed system*) os utilizadores têm a opção de escolha entre viajarem sozinhos ou partilhar a viagem com alguém (Narayanan et al., 2020).

A integração no sistema pode ser feita através de um sistema independente, no qual o serviço implantado não se relaciona com outro modo de transporte. De diferente forma, o sistema pode ser integrado de modo que exista um complemento ao serviço de transportes públicos existente, na forma de um serviço de *last-mile*. Por último, o autor identifica casos especiais, dando como exemplo um serviço de veículos autónomos partilhados dentro de um campus universitário (Narayanan et al., 2020).

De modo a compreender os impactos da implementação de um sistema SAV é necessário compreender os fatores-chave no que diz respeito à modelação destes sistemas. O dimensionamento da frota, a alocação de viagens e o equilíbrio da própria rede são três fatores fundamentais.

Relativamente ao dimensionamento da frota verifica-se que os estudos feitos são essencialmente direcionados para a resolução de modelos que têm como objetivo encontrar o tamanho mínimo para a frota de SAVs de modo a conseguir servir uma determinada procura (Zhao & Malikopoulos, 2022).

Acerca do segundo fator, alocação de viagens, verifica-se que os vários modelos utilizados têm como objetivos a minimização do custo de alocação de viagem e minimização dos tempos de espera. Entre os vários métodos aplicados, os modelos que têm como foco principal estas duas componentes mostram que a sua aplicação leva a um melhor desempenho do sistema através da

redução de tempo de viagem sem passageiros, um menor tempo de espera por viagens e uma melhor variação no tempo de espera (Zhao & Malikopoulos, 2022).

Por último, o equilíbrio do sistema poderá ser avaliado de diferentes formas dependendo das estratégias escolhidas e das variáveis avaliadas em cada modelo. A operacionalidade de uma frota de veículos autónomos partilhados é consideravelmente afetada pela estratégia aplicada tendo em consideração as interdependências entre procura por estacionamento, condições de trânsito e a escolha modal do utilizador (Zhao & Malikopoulos, 2022).

Grande parte dos estudos feitos para a modelação e avaliação de impactos dos sistemas SAV são baseados em modelos já há muito utilizados. Grande parte aponta para o aumento da mobilidade na sua generalidade, ou seja, quilómetros percorridos por veículo e número de utilizadores servidos, e para aumento da eficiência no sistema de transporte (Zhao & Malikopoulos, 2022).

2.4. Problemas de localização de equipamentos

A localização de equipamentos é determinante para grande parte de empresas públicas e privadas. Com o objetivo de implantar novos equipamentos, potenciais locais de construção devem ser identificados. O desenvolvimento e aquisição de um novo equipamento é normalmente um projeto dispendioso e sensível ao tempo, deste modo devem ser determinadas as localizações adequadas, respetivas capacidades e os capitais associados. Enquanto os objetivos que levam à implantação de novos equipamentos dependem das empresas, sejam elas, públicas ou privadas, os custos associados ao processo são elevados e, assim sendo, faz com que qualquer projeto seja um investimento de longo prazo, levando a que a determinação de uma localização ótima para novos equipamentos seja um importante desafio estratégico (Owen & Daskin, 1998).

Como previamente referido, problemas de localização de equipamentos são definidos por dois fatores de grande relevância, tempo e espaço, os quais assumem papéis de igual importância na análise destes problemas. Os problemas em que o espaço é um fator essencial são designados por problemas estáticos de localização de equipamentos, enquanto aqueles em que o fator essencial é o tempo, são designados por problemas dinâmicos de localização de equipamentos (Arabani & Farahani, 2012).

2.5. Modelo p-mediana

O modelo p-mediana insere-se num grupo de modelos mais geral composto por modelos discretos de localização. Estes modelos assumem a existência de um conjunto discreto de localizações onde se define a procura e um conjunto discreto de candidatos para a localização dos equipamentos a implantar. Resolvendo este modelo o objetivo principal centra-se na minimização da distância total média entre os nós do conjunto da procura e os nós do conjunto de candidatos para a implementação dos equipamentos. Numa extensão deste modelo é também formulada uma nova função objetivo na qual é minimizada a soma agregada dos custos de transporte e os custos de implementação de equipamentos (Arabani & Farahani, 2012).

Originalmente, o modelo p-mediana baseava-se em dois pressupostos, o primeiro de que era inicialmente sabido o número de equipamentos a localizar e em segundo a não existência de limites máximos e mínimos em relação à capacidade dos mesmos (Arabani & Farahani, 2012).

Quando se fala de problemas do foro social, o modelo p-mediana contextualiza-se em boa parte com a resolução dos mesmos. A maximização da acessibilidade aos equipamentos, através da minimização da distância agregada entre procura e oferta, revela-se ser mais aceitável na perspetiva do usuário quando se trata de equipamentos de natureza social. Esta vantagem óbvia na aplicação deste tipo de modelos, quando falamos de planeamento de infraestruturas sociais, conduz-nos naturalmente a que, neste contexto, o número de equipamentos a implantar seja um resultado do modelo e não um parâmetro (Arabani & Farahani, 2012).

A evolução do modelo é lógica e a imposição de capacidades máximas e mínimas nos equipamentos é tida como restrição, sendo que capacidades mínimas tendem a ser consideradas visto que poderá ser um bom parâmetro definidor da viabilidade económica de um projeto (Bigotte & Antunes, 2007).

Como referido em Arabani & Farahani (2012) todos os modelos estáticos de localização de equipamentos (como os modelos p-mediana) podem ser adaptados de forma a introduzir dinamismo. Os modelos dinâmicos, podem ser caracterizados em duas subcategorias, modelos dinâmicos explícitos, os quais pré-definem o horário de abertura e de encerramento de um dado

equipamento numa determinada localização, e modelos implícitos dinâmicos, os quais predeterminam que qualquer abertura de um equipamento dentro de um determinado período implicará a abertura deste até ao final desse mesmo período. A aplicação do referido dinamismo ao modelo estático de p-mediana, poderá ir ao encontro de vários tipos de modelos dinâmicos, como por exemplo um modelo multiperíodo, no qual é definido um conjunto que definirá os períodos de abertura dos equipamentos, para além dos conjuntos dos nós que definem a procura e as possíveis localizações de implantação de equipamentos.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados todos os métodos e formas de análise utilizados no decorrer do processo da localização das bolsas de estacionamento e do respetivo dimensionamento.

3.1. Considerações iniciais

Para o desenvolvimento deste trabalho foram considerados dois modelos de otimização distintos, o modelo p-mediana dinâmico e um modelo de custos fixos estático. No que diz respeito ao modelo p-mediana é apresentada uma função objetivo de minimização de distância agregada total entre procura e oferta. O modelo de custos fixos procura minimizar o custo total associado à construção das respetivas bolsas de estacionamento.

Como dito previamente os modelos permitem decidir não só o lugar da implantação, mas também o dimensionamento de cada bolsa, ou seja, o número de lugares atribuídos a cada uma, sendo assim definido que os modelos serão modelos capacitados.

De acordo com a necessidade de cada modelo definem-se neste capítulo todos os parâmetros associados a cada um, nomeadamente os custos e a procura.

Por último, em forma de pós-processamento, foi avaliada a necessidade no que diz respeito à instalação de carregadores de cada bolsa de estacionamento, tendo por base um carro elétrico modelo e as suas características de carregamento. A instalação dos carregadores é um objetivo de relevo, apesar de não ser o principal, visto os veículos serem elétricos conferindo uma boa funcionalidade e integração das bolsas de estacionamento no sistema.

3.2. Fluxograma

O fluxograma que se apresenta em seguida tem como objetivo a representação dos passos seguidos para a realização deste estudo.

Apresenta-se como peça central inicial a aplicação de um modelo de otimização baseado em fluxos, o qual se insere num estudo efetuado para o projeto de investigação Driving2Driverless e que tem como objetivo avaliar a viabilidade de um SAV num contexto interurbano. Este modelo assenta na maximização de lucros e otimiza o tamanho da frota e os seus movimentos. Ora como partes iniciais para a sua construção existem dois elementos-chave, a procura e aquilo que é definido como outros parâmetros. No que diz respeito à procura ela consiste no número de viagens interurbanas pendulares, as quais resultam de uma análise a um inquérito à mobilidade e como outros parâmetros temos os custos, tempo de viagem e preço de serviço.

Com os parâmetros do modelo definidos é construída a função objetivo que maximiza os lucros do SAV em questão. Remetendo ao fluxograma vemos que os resultados obtidos através do modelo de otimização baseado em fluxos, ou seja, os valores das variáveis de decisão existentes na função objetivo, serão considerados como parâmetros em duas situações distintas. De um lado como parâmetros iniciais para a construção de um modelo p-mediana dinâmico e de um modelo de custos fixos e por outro lado nos dados necessários para um pequeno pós-processamento final.

Os modelos p-mediana dinâmico e de custos fixos são os modelos de otimização utilizados para o desenvolvimento do estudo da localização ótima das bolsas de estacionamento. Desta forma e com recurso aos dados obtidos através do modelo primeiramente referido é definido que o fluxo de carros parados será considerado para ambos os modelos, p-mediana e de custos fixos, como o parâmetro da procura.

Especificamente, no que diz respeito ao modelo p-mediana temos como objetivo minimizar a distância total agregada de modo a satisfazer toda a procura, ou seja, localizar os parques de estacionamento necessários para acomodar todos os carros parados em todos os intervalos de tempo considerados.

Relativamente ao modelo de custos fixos, o objetivo principal é, de igual forma, localizar os parques de estacionamento de modo a satisfazer a procura, mas tendo em conta a minimização total dos custos. Como podemos ver no fluxograma, sendo um modelo de custos é então necessária a consideração dos mesmos e assim sendo foram estimados os custos de estacionamento e os custos

de transporte. Foi também avaliado um coeficiente que relaciona os preços medianos do metro quadrado de terreno do conjunto de locais a considerar para a localização das bolsas de estacionamento.

Como já referido, a execução dos modelos apresentar-nos-á as possíveis soluções para a localização e dimensionamento das bolsas de estacionamento. Assim sendo, e apoiando-nos nos resultados obtidos no modelo de otimização baseado em fluxos e nos resultados dos modelos p-mediana dinâmico e de custos fixos, finaliza-se o trabalho com um pós-processamento no qual será avaliado o número de carregadores necessário em cada bolsa de estacionamento, para garantir o carregamento dos veículos, que, como dito anteriormente, serão veículos elétricos.

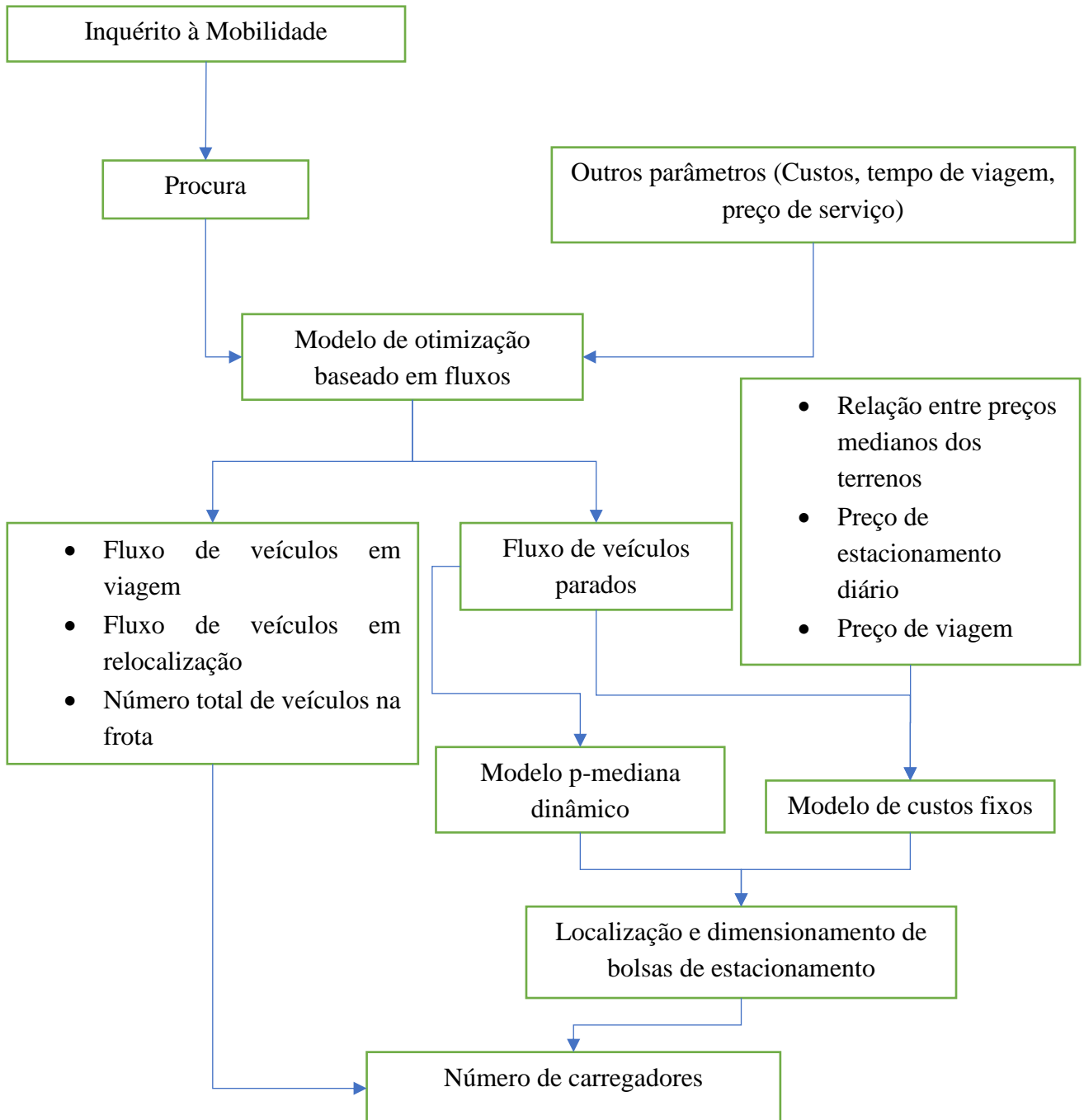


Figura 3.1 – Fluxograma do trabalho desenvolvido.

3.3. Modelo P-Mediana Dinâmico

O modelo p-mediana dinâmico apresenta-se como um modelo de otimização para localização de equipamentos. Neste caso específico serão definidos como equipamentos as bolsas de estacionamento destinada a veículos autónomos elétricos.

No modelo aqui apresentado definem-se três conjuntos diferentes: $\mathbf{J} = \{1, \dots, j, \dots, N\}$ representa centros onde a procura (em número de veículos parados) está localizada, $\mathbf{K} = \{1, \dots, k, \dots, N\}$ representa os possíveis locais onde os diferentes e possíveis parques de estacionamento podem ser construídos e o conjunto $\mathbf{M} = \{1, \dots, m, \dots, M\}$ representa o número de períodos a ser considerado.

Um subconjunto de locais $i \in \mathbf{K}$ é definido no modelo representando os locais de implantação mais próximos de um determinado centro $j \in \mathbf{J}$ de entre todos os locais $k \in \mathbf{K}$.

Variáveis de decisão:

Y_{km} variável binária que representa a decisão de se localizar um parque de estacionamento no local $k \in \mathbf{K}$ em determinado período $m \in \mathbf{M}$;

X_{jkm} variável binária que define a decisão de alocar a procura existente em determinado centro $j \in \mathbf{J}$ a um parque de estacionamento no local $k \in \mathbf{K}$ num determinado período $m \in \mathbf{M}$.

Parâmetros:

U_{jm} é a procura por estacionamento expressa em número de veículos parados em cada centro $j \in \mathbf{J}$ e em cada período $m \in \mathbf{M}$;

D_{jk} distância em quilómetros entre cada centro $j \in \mathbf{J}$ e cada local $k \in \mathbf{K}$;

$Zmin_{km}$ limite mínimo de capacidade, em números de veículos, para cada local $k \in \mathbf{K}$ para cada período $m \in \mathbf{M}$.

Variáveis Auxiliares:

Z_{km} representa a capacidade atribuída a cada parque de estacionamento existente em $j \in \mathbf{J}$ em cada período $m \in \mathbf{M}$.

As distâncias apresentadas foram determinadas com recurso ao Google Maps (Google, 2021), representando a distância real entre cada centro $j \in J$ a cada local $k \in K$ definida pelo percurso que se assume mais rápido. A capacidade de cada possível parque de estacionamento tem de respeitar o limite mínimo definido por $Zmin_{km}$.

Desta forma temos como

Função Objetivo,

$$\text{Minimizar } Dist = \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} D_{jk} U_{jm} X_{jkm} \quad (1)$$

Sujeita a,

$$\sum_{k \in K} X_{jkm} = 1, \quad \forall j \in J, \quad \forall m \in M; \quad (2)$$

$$X_{jkm} \leq Y_{km}, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K, \quad \forall m \in M; \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{i \in K: \\ D_{ji} \leq D_{jk}}} X_{jim} \geq Y_{km}, \quad \forall j \in J, \quad k \in K, \quad \forall m \in M; \quad (4)$$

$$Z_{km} = \sum_{j \in J} U_{jm} X_{jkm}, \quad \forall k \in K, \quad \forall m \in M; \quad (5)$$

$$Z_{km} \geq Zmin_{km} Y_{km}, \quad \forall k \in K, \quad \forall m \in M; \quad (6)$$

$$X_{jkm} \in [0,1], \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K, \quad \forall m \in M; \quad (7)$$

$$Y_{km} \in [0,1], \quad \forall k \in K, \quad \forall m \in M; \quad (8)$$

Define-se como objetivo do modelo a minimização da distância total agregada percorrida pelos veículos que se dirigem a uma bolsa de estacionamento, sendo que a função (1) que a representa é sujeita ao cumprimento de várias restrições. A restrição (2) prende-se com a imposição de que para cada período m existirá sempre uma localização k que receberá toda a procura vinda de um centro j . A restrição seguinte (3) declara que a procura de um dado centro j só poderá ser alocada ao local k se de facto existir um equipamento em k . Em (4) força-se que a alocação da procura seja feita para o local mais próximo, ou para um dos mais próximos caso haja distâncias de igual valor.

As restrições (5) e (6) relacionam-se com a capacidade. Em (5) é definida a variável auxiliar Z_{km} , ou seja, a capacidade em cada parque implantado e em (6) garante-se que a capacidade atribuída pela expressão (5) terá de ser superior a um dado limite, a capacidade mínima. As expressões (7) e (8) definem o domínio das variáveis de decisão.

A consequente execução do modelo é feita através do uso do software FICO Xpress Optimization 8.10, o qual para resolver problemas de otimização de “pequena estrutura” apresenta um bom desempenho no que diz respeito à velocidade de processamento.

Como já referido, a resolução do modelo irá apresentar a localização ótima das bolsas de estacionamento e as respetivas capacidades para a região em estudo, sendo que esses resultados serão apresentados em detalhe no capítulo 5.

3.4. Modelo de Custos Fixos

O modelo de custos fixos aqui apresentado é composto por 2 conjuntos distintos J e K os quais se referem aos centros onde a procura (número de veículos parados) se encontra e aos locais onde existirá a possibilidade de se implantar as bolsas de estacionamento, respetivamente.

Variáveis de decisão:

Y_k variável binária que representa a decisão de se localizar um parque de estacionamento no local $k \in K$;

X_{jk} variável binária que define a decisão de alocar a procura existente em determinado centro $j \in J$ a um parque de estacionamento no local $k \in K$;

Z_k capacidade, em número de veículos, de cada parque de estacionamento localizado em $k \in K$.

Parâmetros:

U_j é a procura expressa em número de veículos parados em cada centro $j \in J$;

D_{jk} distância real em quilómetros entre cada centro $j \in J$ e cada local $k \in K$;

$Zmin_k$ limite mínimo de capacidade (lugares de estacionamento) para cada local $k \in K$;

$Zmax_k$ limite máximo de capacidade (lugares de estacionamento) para cada local $k \in K$;

Ct custo unitário associado ao movimento de veículos em €/Km;

R_k razão entre preço do metro quadrado de terreno do centro $k \in K$ e o centro de referência da região;

Ce custo fixo diário de cada lugar de estacionamento.

Para definir a procura, U_j , considerar-se-á também o número de veículos parados em cada centro, $j \in J$. As distâncias apresentadas foram determinadas com recurso ao Google *Maps* (Google, 2021) representando a distância real entre cada centro $j \in J$ a cada local $k \in K$. O modelo apresenta restrições de capacidades mínimas para cada município $Zmin_k$ e de capacidades máximas $Zmax_k$. Como já se fez notar pela apresentação dos conjuntos do modelo, tanto na procura como nas capacidades, não existe variação dos valores ao longo do período de análise visto que este não é um modelo dinâmico, existindo assim só um período e consequentemente apenas um valor para cada município. As variáveis de decisão são neste caso Y_k , X_{jk} e Z_k , representando a decisão de se implantar uma bolsa de estacionamento num determinado município, a alocação da procura aos estacionamentos e as capacidades dos mesmos, respetivamente.

Sendo este um modelo de otimização que tem como objetivo a minimização de custos, são integrados dois parâmetros de custo, Ct e Ce . O parâmetro Ct representa o custo unitário de transporte em €/Km, relacionando-se assim com a distância percorrida por cada veículo, e o custo fixo Ce representa o valor de estacionamento durante o período de análise no centro de referência, isto é, o centro que serviu de base para definir o parâmetro R_k . Por último, R_k é um parâmetro adimensional que representa a razão entre o preço do centro de referência para o qual é definido Ce e os restantes.

Os valores adotados para cada um destes parâmetros serão devidamente apresentados no capítulo 4. O modelo desenvolvido apresenta a seguinte forma:

Função Objetivo:

$$\text{Minimizar } Custo = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} Ct D_{jk} X_{jk} U_j + \sum_{k \in K} R_k Ce Z_k \quad (1)$$

Sujeita a:

$$\sum_{k \in K} X_{jk} = 1, \quad \forall j \in J; \quad (2)$$

$$X_{jk} \leq Y_k, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K; \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{i \in K \\ D_{ji} \leq D_{jk}}} X_{ji} \geq Y_k, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K; \quad (4)$$

$$Z_k \geq Z_{\min_k} Y_k, \quad \forall k \in K; \quad (5)$$

$$Z_k \leq Z_{\max_k} Y_k, \quad \forall k \in K; \quad (6)$$

$$Z_k \geq \sum_{j \in J} X_{jk} U_j, \quad \forall k \in K; \quad (7)$$

$$X_{jk} \in [0,1], \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K; \quad (8)$$

$$Y_k \in [0,1], \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K; \quad (9)$$

Observando as expressões atrás apresentadas, introduz-se em primeiro lugar a expressão que nos indica a função objetivo (1). Como anteriormente referido, trata-se de um modelo de custos fixos que como objetivo minimizar os custos totais associados à localização das bolsas de estacionamento. A primeira parcela da função define-se pelo custo da energia usada para o deslocamento dos veículos ao parque de estacionamento a eles atribuídos enquanto a segunda parcela refere-se ao custo associado ao uso desse espaço de estacionamento. De seguida, são enumeradas as restrições associadas a este tipo de modelo capacitado. Em (2) é definido que a procura tem de ser totalmente satisfeita. A restrição (3) garante que a procura num determinado centro $j \in J$ só poderá alocada a uma determinada localização $k \in K$, se de facto existir estacionamento nessa localização. Através de (4) garantimos que atribuição da procura será feita para a bolsa de estacionamento mais próxima. As 3 expressões seguintes relacionam-se com a definição das capacidades. Em (5) e (6), as capacidades atribuídas terão de ser superiores a um determinado limite inferior e inferiores a um limite superior, respetivamente e, mais uma vez, temos a expressão (7), definindo que a capacidade atribuída a cada bolsa implantada terá de ser superior à procura para lá alocada. Finalizando, (8) e (9) são expressões que definem o domínio das variáveis de decisão.

Como se pôde verificar através da explicação do modelo, grande parte das restrições são comuns aos dois modelos apresentados, havendo apenas adaptação das mesmas pelo fato de um modelo ser dinâmico e o outro não. Grandes diferenças são visíveis nas funções objetivo utilizadas, sendo elas completamente distintas e, conseqüentemente, nos parâmetros analisados para definir cada uma delas.

Tal como o modelo p-mediana, a resolução do modelo é feita com recurso ao software FICO Xpress Optimization 8.10.

3.5. Definição de Procura

A procura para os modelos utilizados consiste de forma generalizada no número de veículos parados ao longo do período horário diário em cada município.

De forma a compreender como se obtiveram estes valores de veículos parados remete-se o leitor para Santos & Correia (2021), no qual nos é apresentado um modelo de fluxos que tem como objetivo o dimensionamento de um sistema interurbano de veículos autónomos partilhados e respetiva viabilidade financeira.

Na aplicação deste modelo é alvo de análise um inquérito à mobilidade, o qual é o principal estudo no que diz respeito à mobilidade de uma dada região e tem como principal resultado a determinação das várias matrizes origem-destino interurbanas podendo ser elas categorizadas pelos modos de transportes registados no inquérito e pelo período horário também.

Um dos resultados, tido como variável, é então o valor fluxo de carros parados ao longo de 72 períodos de 20 minutos em cada centro, equivalendo a 1 dia, 24h.

Compreende-se neste ponto que existirá uma necessidade de condensação dos dados adquiridos de modo a que a sua aplicabilidade nos modelos, p-mediana e de custos, leve a um estudo intuitivo daquilo que serão tanto os resultados obtidos como as restrições de capacidade a aplicar. Desta forma, determina-se que o fluxo de veículos parados que será analisado, será um fluxo de 72 períodos condensado em 24 períodos, estando assim o mesmo facilmente adaptado em períodos de 1 hora ao longo do dia. O processo utilizado para esta adaptação consistiu em considerar o maior valor de fluxo de carros parados em cada 3 períodos consecutivos ao longo dos 72 existentes para cada centro.

No Quadro 3.1 e Quadro 3.2 apresenta-se um exemplo simples do resultado da aplicação da metodologia atrás descrita. No Quadro 3.1 são apresentados os fluxos ao longo de 3 períodos consecutivos, correspondentes ao Centro 1. Nota-se que para a representação dos valores de fluxo é dada pela letra s , e para os períodos a letra t . No Quadro 3.2 é mostrado o resultado da condensação dos 3 fluxos de 20 minutos para o período de 1 hora.

A Figura 3.2 evidencia a comparação do resultado da condensação de fluxos de veículos parados e do fluxo de viagens ao longo do dia.

Quadro 3.1 - Fluxos iniciais

Centro	Períodos de 20 minutos		Fluxo
	t1	t2	s
1	1	2	604
1	2	3	611
1	3	4	617

Quadro 3.2 - Fluxos condensados

Centro	Períodos de 1 hora		Fluxo
	t1	t2	s
1	1	2	617

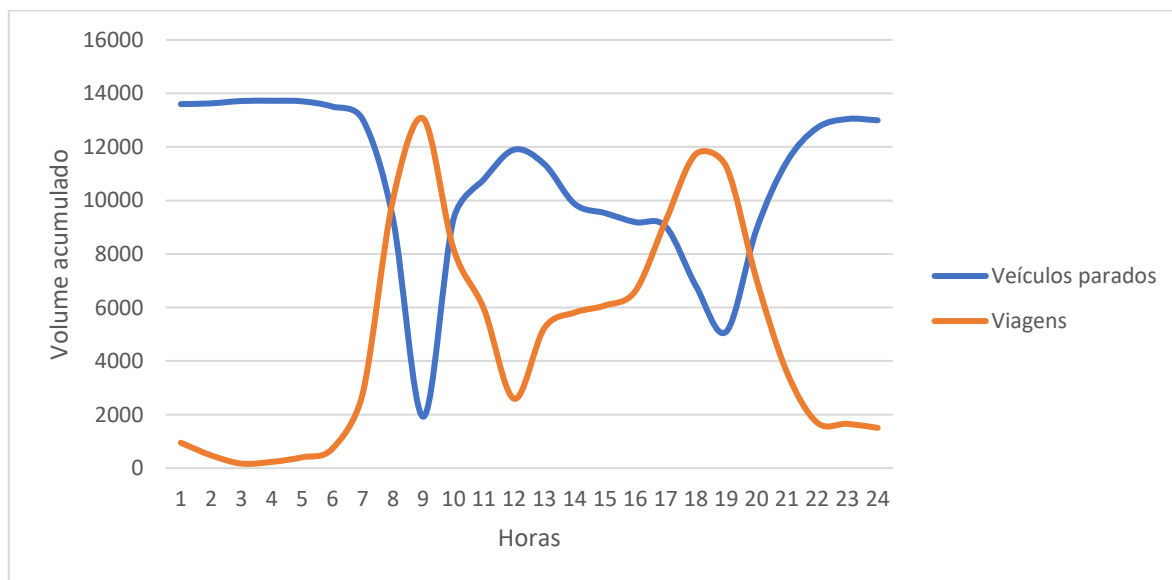


Figura 3.2 - Volume acumulado de veículos parados e de viagens ao longo do dia.

3.6. Definição dos custos para o modelo de custos fixos

O modelo de custos fixos exige o conhecimento dos custos associados à função objetivo utilizada. Como definido anteriormente, em causa está a definição do custo C_t e C_e , os quais representam o custo de transporte por Km e o custo associado ao estacionamento do veículo num determinado parque.

No que diz respeito a C_t , o valor é definido relacionando o consumo de um modelo de veículo ligeiro por km e o preço da eletricidade, ou seja, em €/Km. O parâmetro C_e é o custo fixo diário de cada lugar de estacionamento em euros. Este associa-se ao parâmetro R_k que define a razão entre preços de todos os centros considerando como unidade o centro onde o valor é o mais elevado, ou seja, C_e corresponde ao valor do estacionamento em euros relativo ao centro que tem como R_k a unidade. A consideração deste valor tem por base a ideia já existente em várias cidades na qual o utilizador que tem a necessidade de estacionar o seu veículo fora da sua área de residência, tem a oportunidade de adquirir um “bilhete” diário de preço fixo e assim não se sujeitar a um pagamento fracionado e conseqüentemente mais dispendioso. Desta forma o valor de C_e foi definido em 3 €/dia, tendo como base os preços praticados para a cidade de Lisboa (Emel, 2021) devido à ausência deste tipo de dado para a região em estudo.

3.7. Dimensionamento dos pontos de carregamento a serem integrados nas bolsas de estacionamento

Como definido inicialmente, o estudo da localização e dimensionamento das bolsas de estacionamento tem como base uma frota de veículos autónomos e elétricos inseridos num sistema de mobilidade SAV tornando inequívoco o pensamento de que existirá necessidade de garantir o carregamento da frota sem quebras na disponibilidade para servir a procura de viagens.

Assim sendo, foi analisada a possibilidade de instalação dos carregadores necessários nos parques a serem localizados, garantindo que os carregamentos serão apenas feitos após o cumprimento de todas as viagens agendadas para um dia.

Para o cálculo em questão foi assumido que:

- Os veículos carregarão apenas no horário noturno
- Os veículos iniciam o dia com 100% de bateria e carregam até atingirem 100%

Consoante as condições definidas os carregadores serão então distribuídos apenas pelos parques nos quais estarão estacionados veículos durante a noite e garantindo assim carregamento completo das baterias antes do início da atividade do dia seguinte. Isto de forma a garantir que não haverá necessidade de carregamento durante o dia quando o preço da energia é mais elevado, apesar dos carros poderem estar estacionados num parque durante parte do horário diurno.

4. ESTUDO DE CASO

No presente capítulo será apresentado o estudo de caso ao qual foi aplicada a metodologia previamente definida.

O estudo de caso considerado é a região de Coimbra, Figura 4.1, região esta, identificada como nível 3 das NUTS (Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos). A região de Coimbra é composta por 19 municípios, dos quais 17 pertencem ao Distrito de Coimbra (Arganil, Cantanhede, Coimbra, Condeixa-a-Nova, Figueira Foz, Góis, Lousã, Mira, Miranda do Corvo, Montemor-o-Novo, Oliveira do Hospital, Pampilhosa da Serra, Penacova, Penela, Soure, Tábua, Vila Nova de Poiares), 1 ao Distrito de Aveiro, Mealhada, e outro ao Distrito de Viseu, Mortágua. A população é composta por cerca de 460 mil habitantes e tem uma área de 4335 Km². A capital da região é a cidade de Coimbra, a qual tem 140796 habitantes (INE, 2021).

Coimbra é o polo de ensino e de emprego da comunidade intermunicipal (CIM). A Universidade de Coimbra é a referência desta cidade tendo 25580 alunos, dos quais 21229 são nacionais e empregando mais de 3000 pessoas (Universidade de Coimbra, 2021). O ensino em Coimbra assume uma importância relevante aquando do estudo da mobilidade da região devido aos movimentos pendulares que origina.

No que diz respeito à região de Coimbra verifica-se que nos movimentos pendulares o modo mais utilizado é o veículo automóvel, que representa cerca de 72% das viagens. Esta percentagem está cerca de 10% acima da média nacional. A escolha de transporte público para este tipo de movimentos representa para os habitantes da Comunidade Intermunicipal da Região de Coimbra (CIM-RC) 16% das viagens, um valor abaixo da média nacional que ronda os 20%. O município de Coimbra tendo a rede de transportes públicos mais abrangente da CIM verificou um decréscimo ao longo dos anos na sua utilização, apesar da manutenção da rede (TRENMO Engenharia, 2016).

Especificamente para toda a CIM-RC, contamos com 9 operadores que prestam serviços de transporte público intra e intermunicipal e verificamos que apesar da tentativa de abranger toda a região com estes serviços complementares, os concelhos com menor população são mal servidos por estes serviços de transporte.

O serviço ferroviário é composto por: Linha do Norte que faz a ligação Lisboa-Porto, a qual serve os municípios de Coimbra, Soure e Mealhada; Linha Oeste que se liga à Linha do Norte, tendo como destino principal Figueira da Foz; Linha da Beira Alta que tem como destino final Espanha; e Ramal de Alfarelos, que une a linha do Norte e a Linha do Oeste entre Alfarelos e a Bifurcação de Lares.



Figura 4.1 - Região de Coimbra.

Apesar da rede ferroviária apresentar algumas soluções, aquela que se encontra instalada na região de Coimbra é de longe de inferior qualidade quando comparado com os serviços suburbanos do Porto e Lisboa. O serviço existente é incapaz de captar procura, sendo por causa da frequência da oferta, dos preços cobrados ou dos tempos de viagem. A título de exemplo, o sistema suburbano de Coimbra apenas liga Coimbra à Figueira da Foz custando cerca de 2.60€ por viagem com tempos que variam entre os 54 minutos e os 81 minutos para 42Km de viagem, o que se pode afirmar ser muito pouco atrativo e de pobre qualidade para a população a efetuar viagens diárias (TRENMO Engenharia, 2016).

A aparente ineficácia do sistema de transportes existente para a região pondera a criação de uma alternativa. Considerando a criação de um sistema de mobilidade partilhada constituída por

veículos autónomos poderá trazer um aumento da qualidade da mobilidade para a região, principalmente no que se refere a viagens interurbanas.

A consideração de um sistema deste tipo poderia ser vantajosa em termos de acessibilidade e de custos. A cobrança de preços mais elevados pelo transporte em zonas de baixa procura e consequentemente o baixo rendimento obtido pelas transportadoras para existirem rotas adequadas às populações em causa, poderá deixar de ser um fator preponderante visto deixar de ser necessário contratar motoristas. De igual forma o aumento de acessibilidade por parte das povoações mais afastadas dos centros, não só trará equidade à população que se sente esquecida pelo sistema de transportes na região de Coimbra, mas também, com esta nova possibilidade de mobilidade, suscitará o próprio desenvolvimento da região.

Assim sendo, a implementação de um sistema de veículos autónomos partilhados leva à ponderação de vários fatores importantes à sua viabilidade sendo um deles o acondicionamento dos veículos que iriam incorporar este sistema.

Deste modo é considerado para o estudo de caso um sistema independente de veículos autónomos elétricos e partilhados misto, tendo em conta dois cenários aos quais são aplicados os modelos de otimização da forma apresentada nos Quadro 4.1 e Quadro 4.2:

Cenário A – cada veículo transporta uma só pessoa;

Cenário B – cada veículo transporta no máximo 4 pessoas.

Nos cenários considerados assume-se que a implementação deste sistema não terá efeito nos tempos de viagem considerados e consequentemente na velocidade média considerada para as viagens, 60Km/h. O sistema proposto apenas contemplará fluxos resultantes de viagens interurbanas, considerando-se que estas viagens são eficazmente realizadas pelos serviços de transporte público ou pela utilização do veículo privado.

Para os cenários propostos e com o objetivo de se proceder ao cálculo do número de carregadores a ter em conta em cada parque de estacionamento considera-se o “*Renault Zoe E-Tech Elétrico*” para carro modelo, o qual tem como preço base 32.690€ (Renault, 2021).

Quadro 4.1 – Casos analisados nos cenários A e B para o modelo p-mediana

Cenário A				Cenário B			
Modelo	Caso	Capacidades Mínimas	Períodos	Modelo	Caso	Capacidades Mínimas	Períodos
p-Mediana	1	1500	Diurno	p-Mediana	1	300	Diurno
		2000	Noturno			450	Noturno
	2	1000	Diurno		2	450	Diurno
		1500	Noturno			300	Noturno
	3	1500	Diurno		3	450	Diurno
		1000	Noturno			450	Noturno
	4	2000	Diurno		4	600	Diurno
		1500	Noturno			600	Noturno
	5	2000	Diurno		5	450	Diurno
		2000	Noturno			600	Noturno
	6	1500	Diurno		6	600	Diurno
		1500	Noturno			450	Noturno
	7	500	Diurno		7	600	Diurno
		1500	Noturno			300	Noturno

Quadro 4.2 – Casos analisados nos cenários A e B para o modelo de custos fixos

Cenário A				Cenário B			
Modelo	Caso	Capacidades		Modelo	Caso	Capacidades	
Custos Fixos	1	Mínima	2500	Custos Fixos	1	Mínima	300
		Máxima	5000			Máxima	1000
	2	Mínima	1000		2	Mínima	600
		Máxima	2500			Máxima	1000
	3	Mínima	500		3	Mínima	900
		Máxima	2500			Máxima	2000
	4	Mínima	1500		4	Mínima	800
		Máxima	2500			Máxima	1500
	6	Mínima	1500		5	Mínima	700
		Máxima	5000			Máxima	1500
	7	Mínima	1750		7	Mínima	1750
		Máxima	5000			Máxima	5000
	8	Mínima	2000		8	Mínima	2000
		Máxima	5000			Máxima	5000

4.1. Cenário A – cada veículo transporta uma só pessoa

No cenário A, o sistema em causa é um sistema de mobilidade partilhada composto por uma frota de veículos autónomos elétricos transportando apenas uma pessoa por veículo. Este encara uma perspetiva mais desfavorável para o sistema, uma vez que o facto de transportar apenas uma pessoa em cada viagem implica a utilização de um maior número de veículos para satisfazer a procura.

Considerando a aplicação dos modelos anteriormente apresentados é analisada a variação de volume de fluxo ao longo do dia para o cenário em causa. Na Figura 4.2 é apresentado o volume de carros parados para cada município da região de Coimbra ao longo de 24 horas.

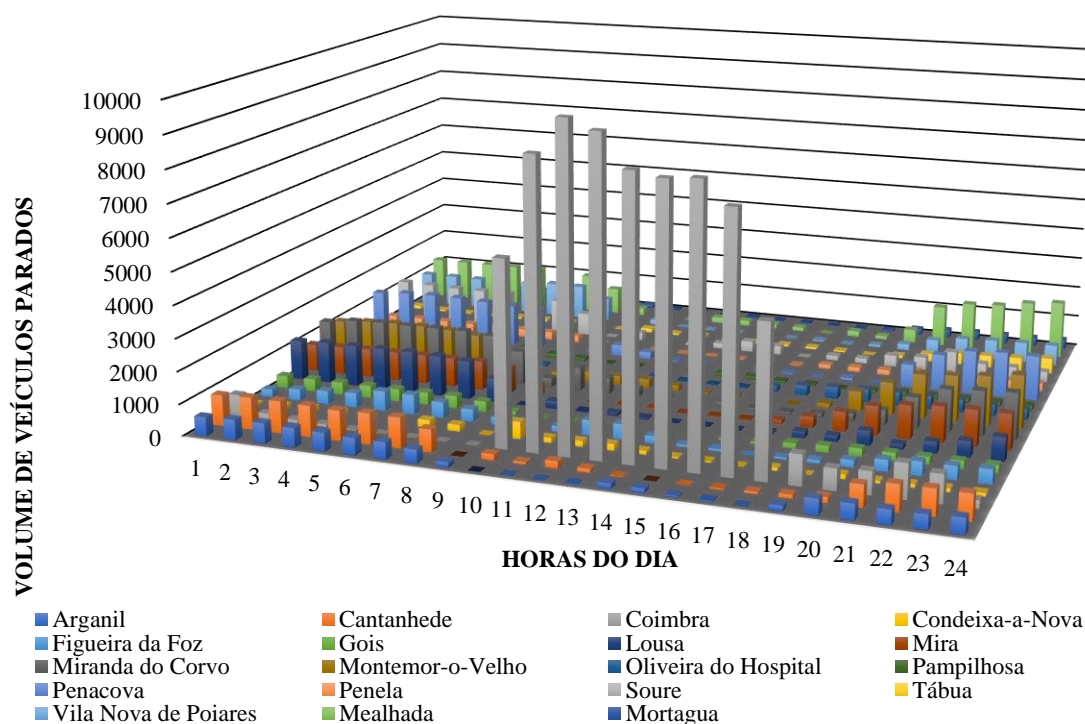


Figura 4.2 - Volume de veículos parados ao longo de um dia por município.

Como se pode verificar pela Figura 4.3, entre as 10 horas da manhã e as 19 horas da noite existe um volume de carros parados bastante elevado na cidade de Coimbra, o que se justifica pelo facto de as viagens consideradas serem interurbanas pendulares e também por Coimbra ser a cidade com maior poder de atração de tráfego da região. No restante horário, o horário noturno, o volume de veículos parados na cidade de Coimbra é muito baixo levando a que maior parte da distribuição seja feita pelos restantes municípios. A Figura 4.3 mostra a comparação entre o volume de veículos parados em Coimbra e o somatório dos volumes de veículos parados de todos os outros municípios.

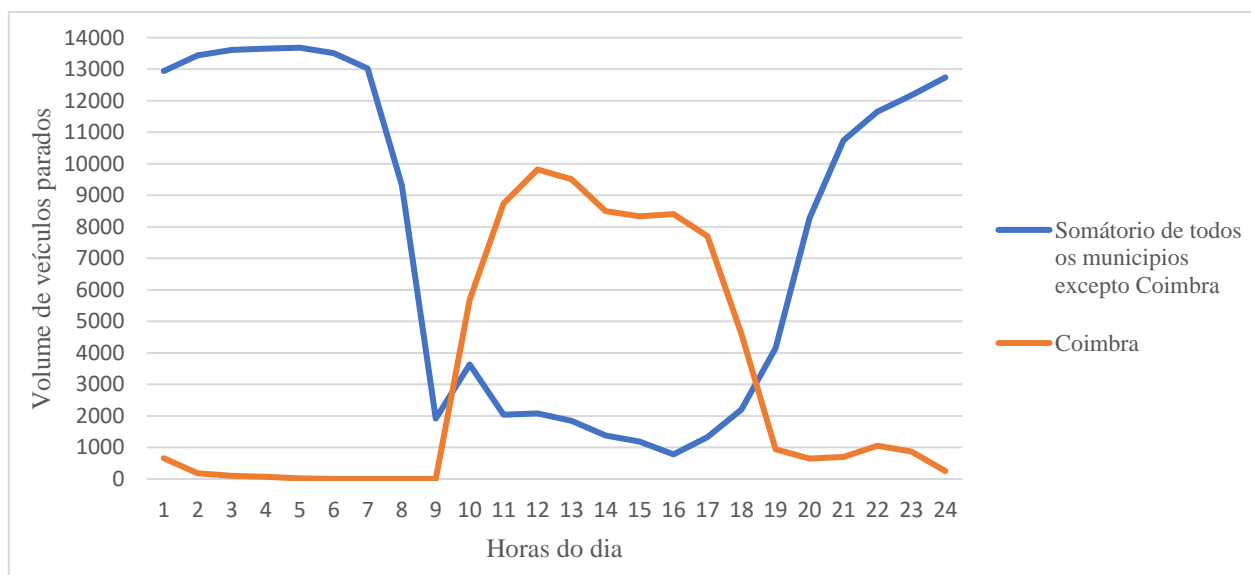


Figura 4.3 – Coimbra vs. Restantes municípios.

Analisando a figura compreendemos que para a região de Coimbra existem dois períodos claramente definidos: o período noturno, que se compreende desde as 19h às 9h da manhã e é definido por uma distribuição idêntica entre todos os municípios à exceção de Coimbra; e o período diurno, desde as 9h às 19h, no qual o município de Coimbra tem principal destaque.

Tendo em conta esta definição é possível representar aquilo que foi considerado como procura, o volume de veículos parados, para o modelo p-mediana. A Figura 4.4 mostra os valores considerados no modelo para período diurno.

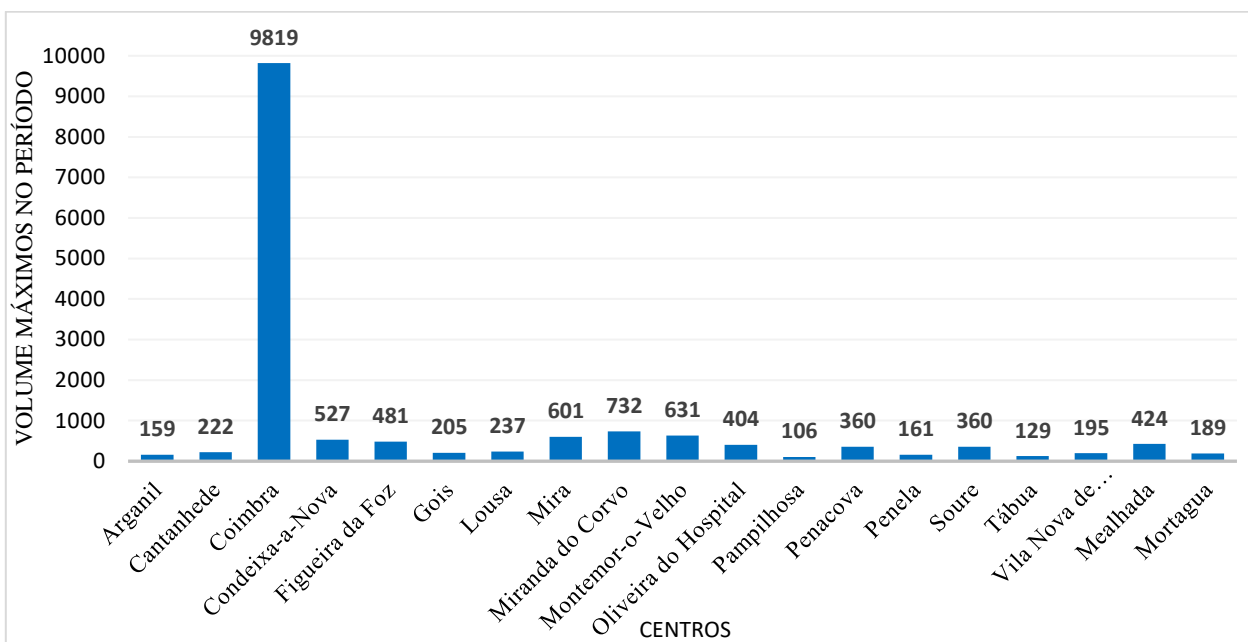


Figura 4.4 - Volume de veículos parados em cada centro entre as 9h e as 19h.

De igual forma na Figura 4.5 são dados os mesmos valores para o período noturno:

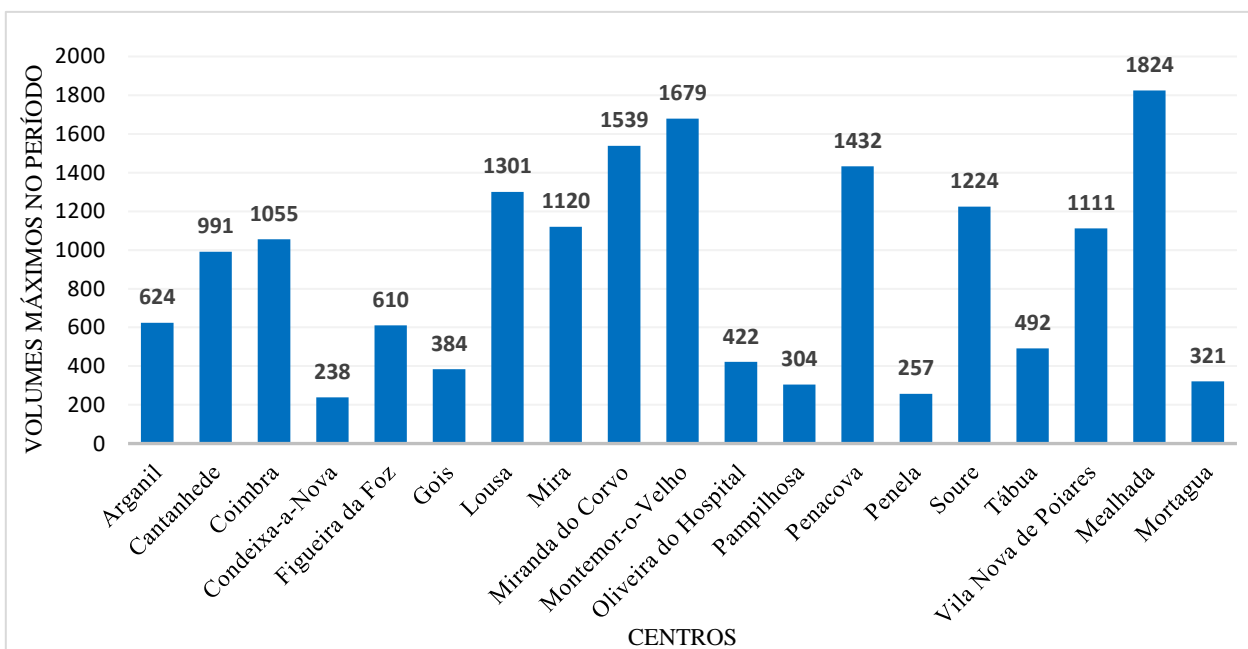


Figura 4.5 – Volume máximo de veículos parados em cada centro entre as 19h e as 9h.

No que diz respeito à aplicação do modelo de custos fixos, para a avaliação do custo definido como variável, Cv_k , foram analisados os valores referentes ao valor mediano das vendas por metro quadrado de alojamentos familiares do segundo trimestre de 2020 na região de Coimbra. Convém-se que este parâmetro não define exatamente o valor por metro quadrado de terreno para construção da região, no entanto, fazendo a razão entre municípios, tendo como unidade o município onde o valor é o mais elevado, podemos obter uma relação entre preços a nível regional de modo a definir aquele que seria o preço real. No Quadro 4.3 apresentam-se os preços e as relações aplicadas ao modelo em questão.

Quadro 4.3 - Razão de preços para a região de Coimbra.

Municípios	Valor mediano das vendas por metro quadrado de alojamentos familiares (€/m ²) (3 trimestre 2020)	Razão entre Coimbra e os restantes municípios
Arganil	446	0,339
Cantanhede	709	0,539
Coimbra	1316	1,000
Condeixa-a-Nova	875	0,665
Figueira da Foz	1000	0,760
Gois	336	0,255
Lousa	685	0,521
Mira	912	0,693
Miranda do Corvo	571	0,434
Montemor-o-Velho	750	0,570
Oliveira do Hospital	569	0,432
Pampilhosa	263	0,200
Penacova	395	0,300
Penela	561	0,426
Soure	638	0,485
Tábua	550	0,418
Vila Nova de Poiares	582	0,442
Mealhada	745	0,566
Mortágua	451	0,343

Relativamente àquele que se considera um dos custos fixos do modelo, Ct , é definido o valor de 0,20€/km (EDP, 2021) valor que corresponde ao preço da energia quando o carregamento do veículo é efetuado fora de casa.

Tal como para o modelo p-mediana foi também feita a análise de qual seria a procura a considerar neste modelo de custos. Ao contrário do anterior, não existe dinamismo associado ao modelo em questão, não havendo então necessidade de se avaliar a procura por períodos. Assim sendo, a procura considera apenas os valores máximos correspondentes ao período horário diário, como mostra a Figura 4.6.

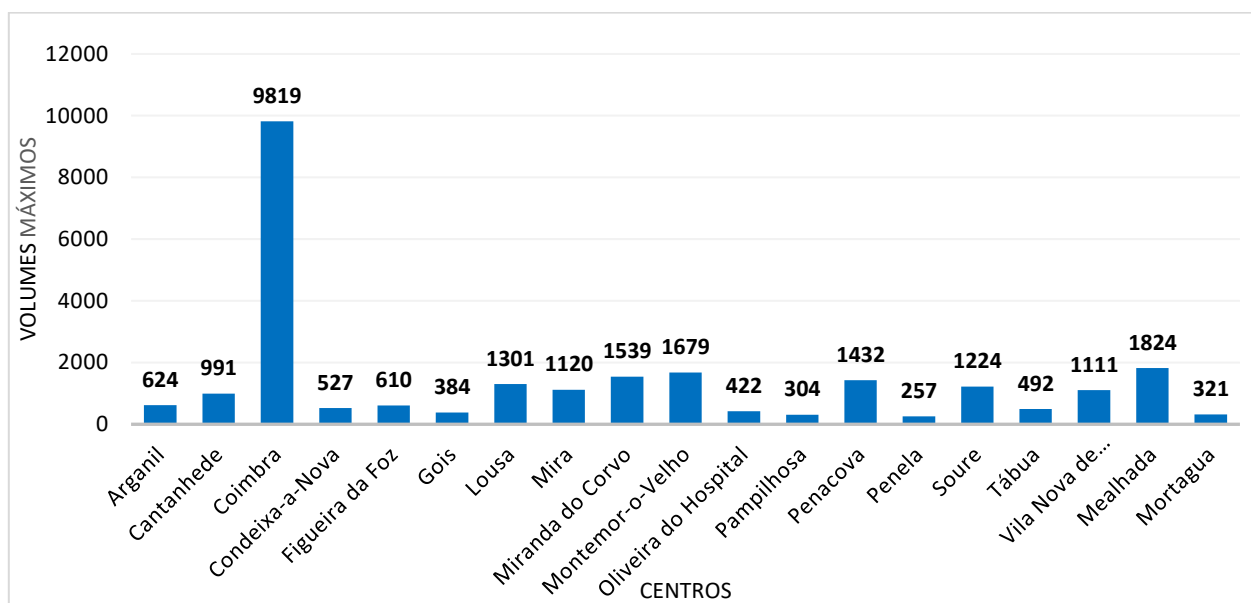


Figura 4.6 - Volume máximo diário para cada centro.

Com atribuição de valores definida para cada componente de cada modelo revelam-se no capítulo seguinte a distribuição e dimensionamento das bolsas de estacionamento a serem implantadas na região de Coimbra.

4.2. Cenário B – cada veículo transporta no máximo 4 pessoas

Nesta subcapítulo serão definidas as características do cenário B. Como previamente referido, para este cenário cada veículo poderá transportar no máximo 4 pessoas em cada viagem. O resultado da aplicação desta condição, como se poderá antecipar, terá efeito naquilo que é definido como a procura para os modelos aplicados, o volume de carros parados.

De igual forma à apresentada para o cenário anterior, a análise efetuada para a execução de cada modelo é composta pelos mesmos princípios e ideias, ou seja, análise de volumes de veículos parados para a definição de períodos para o modelo p-mediana, assim como os preços para o modelo de custos fixos.

Assim sendo e relativamente ao modelo de otimização p-mediana temos na Figura 4.7 a comparação entre o volume acumulado de veículos parados ao longo do dia para todos os municípios à exceção de Coimbra com o volume só para a cidade de Coimbra.

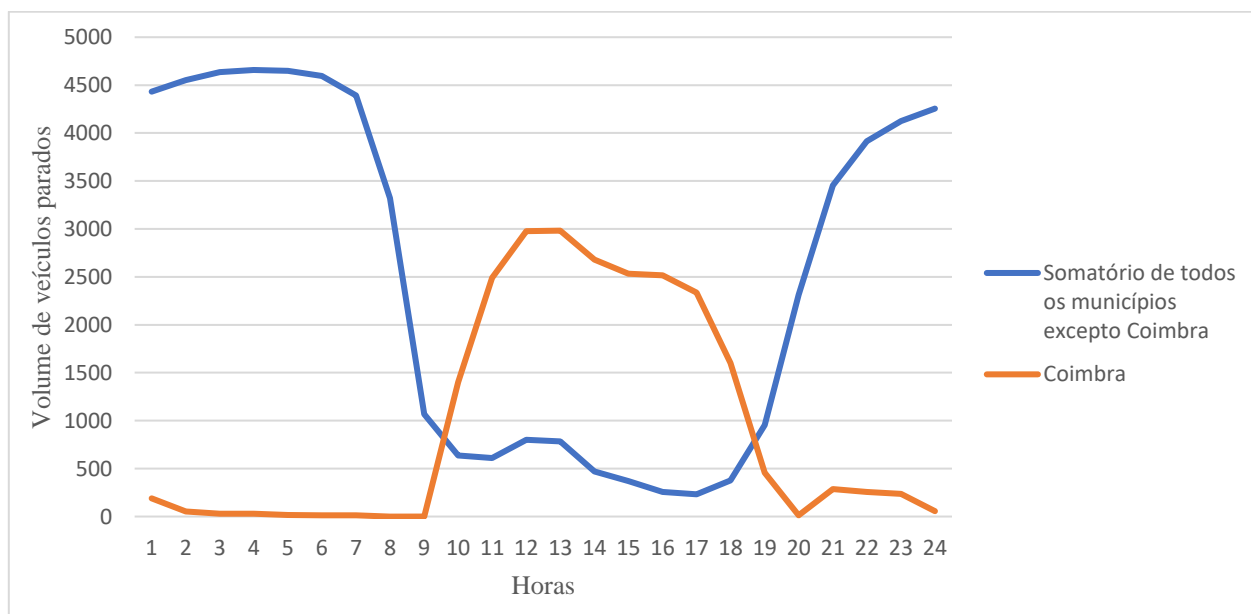


Figura 4.7 - Volume acumulado de veículos parados ao longo do dia.

Observando esta figura nota-se que apesar do aumento de volume de pessoas por viagem efetuada e conseqüente diminuição do número de veículos parados, os períodos que irão definir a procura no modelo p-mediana serão exatamente os mesmos para ambos os cenários, ou seja, um período diurno das 9h às 19h, e um período noturno, das 19h às 9h. Desta forma apresentam-se nas figuras seguintes, Figura 4.8 e Figura 4.9 os valores da procura considerados para os respetivos períodos diurno e noturno.

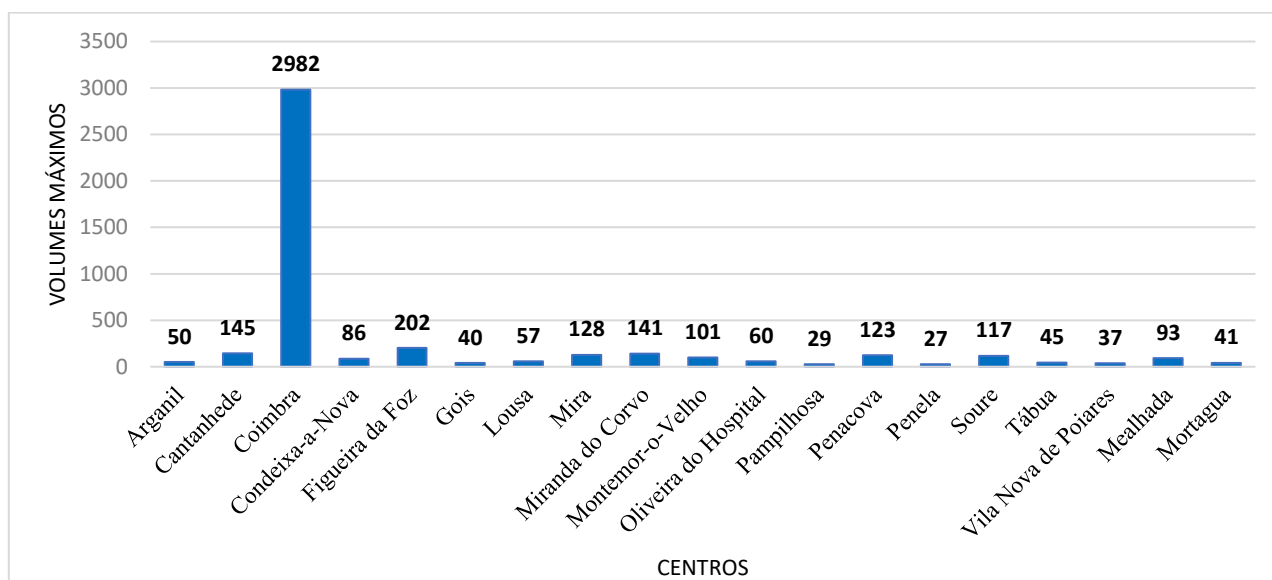


Figura 4.8 - Volume de veículos parados em cada centro entre as 9h e as 19h.

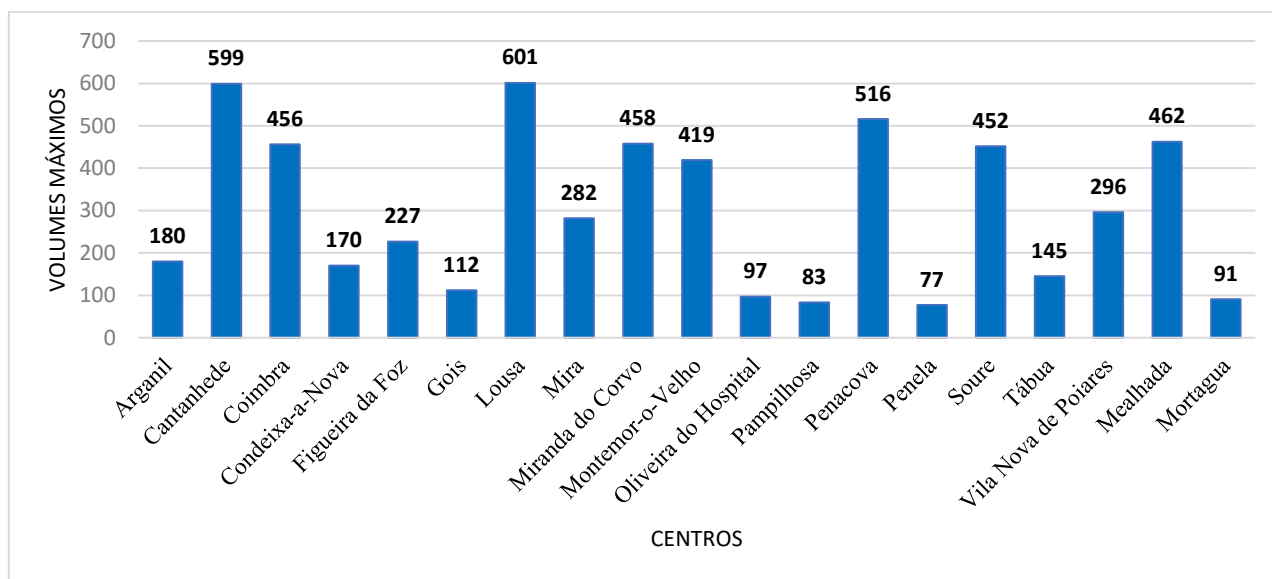


Figura 4.9 - Volume de veículos parados em cada centro entre as 19h e as 9h.

Relativamente ao segundo modelo de otimização, modelo de custos fixos, somos redirecionados no que diz respeito aos valores definidos para os custos já anteriormente apresentados no cenário A, no entanto, para a definição da procura a Figura 4.10 apresenta-nos os valores considerados no modelo em questão.

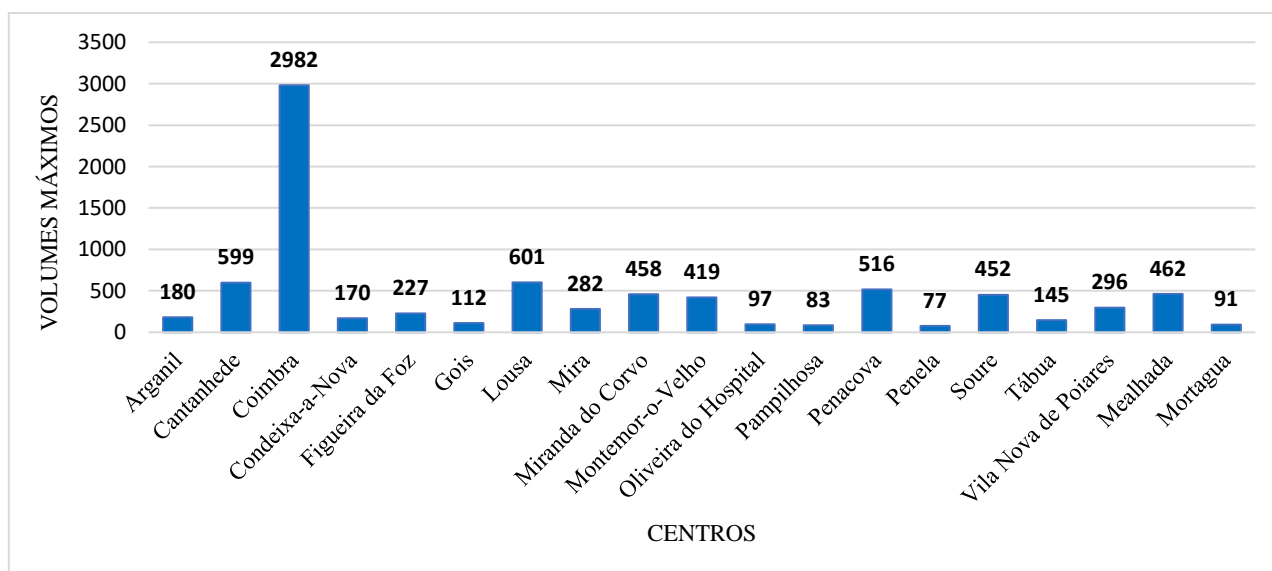


Figura 4.10 - Volumes máximos diários de veículos parados.

4.3. Definição do número de pontos de carregamento de baterias

Inicialmente foram calculados os tempos médios de movimento de cada veículo tendo em conta o tempo utilizado em transporte de passageiros e o tempo utilizado nas relocalizações, como por exemplo deslocação ao parque de estacionamento. Com recurso aos dados resultados do modelo de fluxos (Santos & Correia, 2021) previamente referido verifica-se no Quadro 4.4 e Quadro 4.5 que para todos os veículos da frota temos:

Quadro 4.4 – Tempo total de movimento dos veículos do sistema SAV

	Horas
Tempo total dos veículos em transporte	81.934
Tempo total dos veículos em relocalizações	14.084
Tempo total em movimento	96.019

Tendo acesso ao número de veículos total em uso concluímos que em média um veículo encontra-se em movimento cerca de 7 horas por dia e, conseqüentemente, estará parado cerca de 17 horas.

Quadro 4.5 - Tempo total em movimento por veículo

Tempo total em movimento	Hora
	96.019
Número total de veículos	Veículo
	13.764
Tempo total em movimento por veículo	Hora/veículo
	6,976

Com o objetivo final de determinar o número de carregadores a ser instalado é então necessário, não só definir os consumos dos veículos em circulação, mas também o tempo de carregamento associado aos mesmos. Para isso, como já referido, foi considerado o modelo Renault Zoe E-Tech Elétrico, com o motor R110 e bateria E.V 50. O modelo em causa tem autonomia até 395Km

quando 100% carregado e, utilizando um carregador de 22kW AC, necessita de 2 horas e 54 minutos para atingir autonomia máxima (Renault, 2021).

Definidas as características do veículo apresenta-se no Quadro 4.6 a distância total percorrida por dia por veículo, obtida de (Santos & Correia, 2021)

Quadro 4.6 - Distância percorrida por veículo.

Tempo total em movimento	Hora
	6,976
Distância Média Percorrida	Km
	363,261

Verificamos que, em média, um veículo pertencente a um sistema nas condições atrás apresentadas, terá autonomia para efetuar todas as viagens a que se propõe.

Finalmente, sabendo o tempo necessário de carregamento para atingir uma autonomia de 100% e o tempo em que um veículo terá oportunidade de carregar, ou seja, durante o período noturno temos o Quadro 4.7.

Quadro 4.7 - Número de veículos a serem carregados

Tempo total parado	Hora/Veículo
	17
Tempo de carregamento completo	Horas
	2:54
Número de veículos a serem carregados	Veículos
	5,86

Mostra-se assim que, o tempo médio que um veículo se encontra parado durante o horário noturno daria para um único veículo ser carregado 5 vezes, e, assim sendo, concluímos que um carregador dará para acomodar 5,86 veículos, ou seja, carregar 5 veículos do 0% aos 100%, havendo ainda uma margem, não deixando o veículo ficar completamente descarregado.

5. RESULTADOS

No presente capítulo apresentam-se os resultados obtidos através da aplicação dos modelos p-mediana e de custos fixos ao caso de estudo previamente definido para cada cenário.

Compreende-se que os valores de seguida apresentados são consequência direta em primeiro lugar da abordagem metodológica, no que diz respeito à definição de parâmetros associados a cada modelo.

No que se relaciona aos resultados que advém da aplicação do modelo p-mediana são tidos em análise duas características de relevo, o valor resultante da função objetivo e a homogeneidade entre a localização dos parques de estacionamento em cada período. Para o modelo de custo fixos os resultados serão analisados tendo em conta o valor da função objetivo associada.

Dando então início à recolha de resultados foram analisadas as variações possíveis em cada modelo de modo a se avaliar os possíveis panoramas da distribuição dos parques de estacionamento. Os Quadro 5.1 e Quadro 5.2 mostram os resultados obtidos na resolução do modelo de otimização nas quais o parâmetro variável é a capacidade mínima associada ao modelo p-mediana para ambos os cenários A e B.

Pela observação do Quadro 5.1 verificamos que tendencialmente soluções nas quais são definidos maiores valores de capacidades mínima, levam a uma menor quantidade de localização de parques de estacionamento na região e conduzem a um maior valor da função objetivo. De forma contrária valores limite menores de capacidades para os parques de estacionamento levarão a um maior número de parques de estacionamento a implantar, mas revelando menores valores de função objetivo. Assim sendo, e indo de encontro àquilo que foi definido na análise de resultados, o caso número 7 do cenário A para o modelo p-mediana, encontra em primeiro lugar o valor mais baixo de função objetivo e apesar de se verificar um elevado número de parques de estacionamento poderemos verificar através do Quadro 5.2 que existe relativa homogeneidade entre os parques localizados em cada período, ou seja, pelo menos metade funcionará em ambos os períodos.

Quadro 5.1 - Resultados para o modelo p-mediana no cenário A

Cenário A				
Caso	Capacidades Mínimas	Períodos	Valor função objetivo (km)	Nº de parques na região
1	1500	9h - 19h	279.072	9
	2000	19h - 9h		
2	1000	9h - 19h	214.674	10
	1500	19h - 9h		
3	1500	9h - 19h	212.752	13
	1000	19h - 9h		
4	2000	9h - 19h	276.389	10
	1500	19h - 9h		
5	2000	9h - 19h	295.390	9
	2000	19h - 9h		
6	1500	9h - 19h	260.071	10
	1500	19h - 9h		
7	500	9h - 19h	172.519	11
	1500	19h - 9h		

Quadro 5.2 - Resultados para o Caso 7 do modelo p-mediana no cenário A.

Caso 7		
Locais de Implantação	Períodos	Capacidades
Cantanhede	19h - 9h	2.111
Coimbra	9h - 19h	9.819
Condeixa-a-Nova	9h - 19h	1.048
Condeixa-a-Nova	19h - 9h	2.774
Lousã	9h - 19h	707
Lousã	19h - 9h	1.989
Mira	9h - 19h	601
Miranda do Corvo	9h - 19h	732
Miranda do Corvo	19h - 9h	1.539
Montemor-o-Novo	9h - 19h	1.112
Montemor-o-Novo	19h - 9h	2.289
Oliveira do Hospital	9h - 19h	533
Penacova	9h - 19h	555
Penacova	19h - 9h	2.543
Tábua	19h - 9h	1.538
Mealhada	9h - 19h	835
Mealhada	19h - 9h	2.145

Como podemos verificar pelo quadro atrás apresentado notamos que dos 11 locais onde poderão ser implantados os novos parques de estacionamento 5 funcionarão num só período e os restantes 6 funcionarão em ambos os períodos. Ilustrando a possível definição da solução atrás apresentada temos na Figura 5.1 e Figura 5.2 o mapa no qual são apresentadas as capacidades de cada parque de estacionamento no respetivo período e município. O número de carregadores associado a cada parque é apresentado também na Figura 5.3. Note-se que apenas nos parques associados ao horário noturno estarão instalados carregadores.

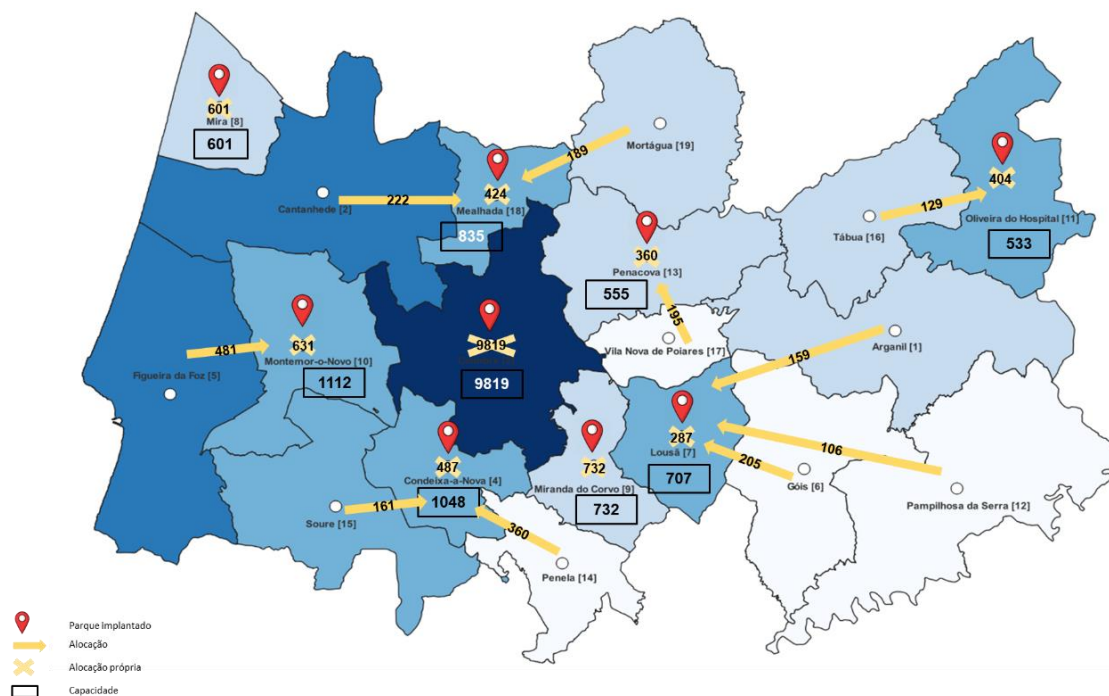


Figura 5.1 - Representação esquemática da solução ótima para o caso 7: período diurno.

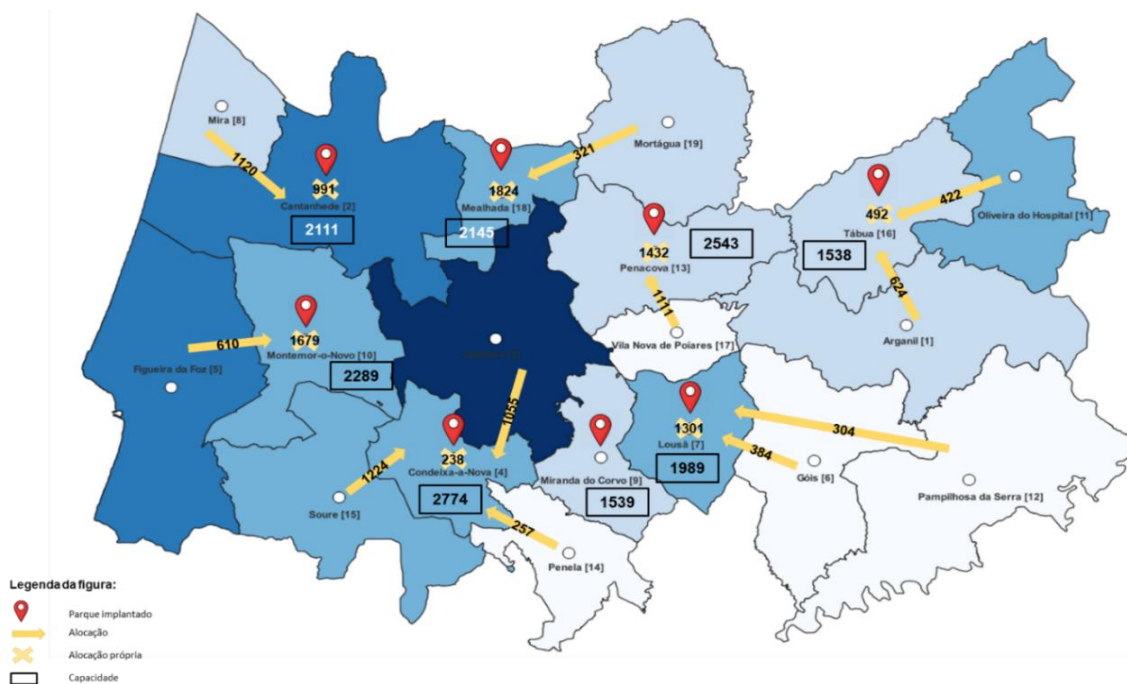


Figura 5.2 - Representação esquemática da solução ótima para o caso 7: período noturno.

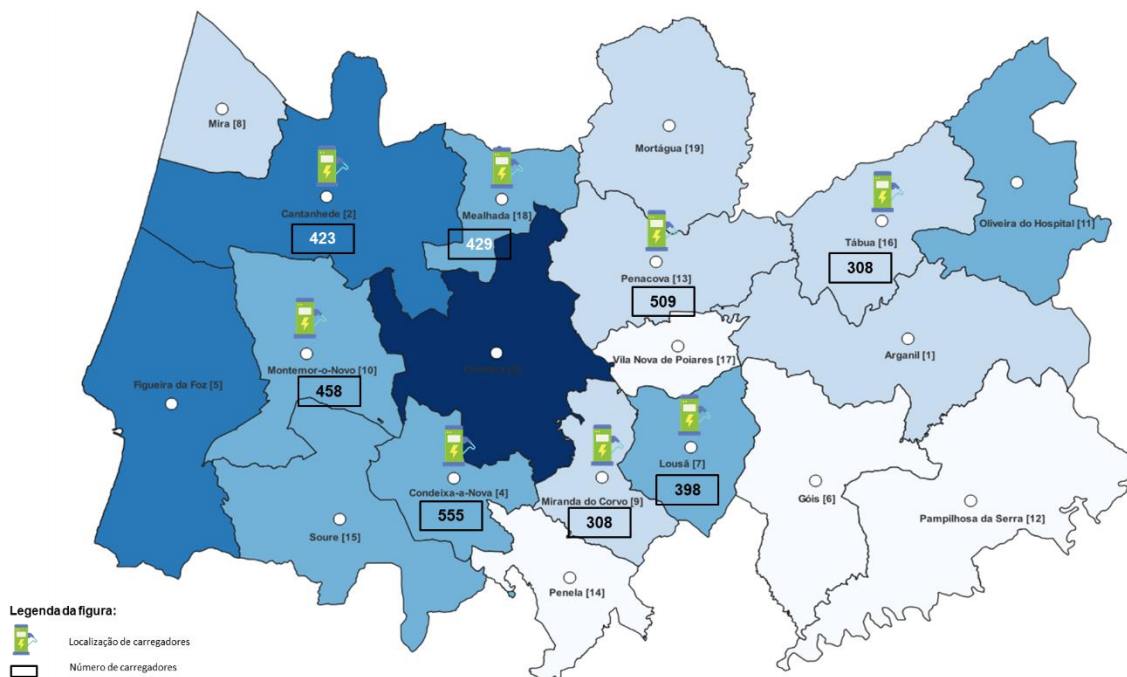


Figura 5.3 - Localização e número de carregadores para os parques no período noturno.

Considerando o cenário B o método de análise de resultados é composto pela mesma visão e assim sendo temos no Quadro 5.3 os seguintes resultados.

Quadro 5.3 - Resultados para o modelo p-mediana no cenário B

Cenário B				
Caso	Capacidades	Períodos	Valor função objetivo (km)	Nº de parques na região
1	300	9h - 19h	52.348	10
	450	19h - 9h		
2	450	9h - 19h	72.285	11
	300	19h - 9h		
3	450	9h - 19h	73.425	10
	450	19h - 9h		
4	600	9h - 19h	90.640	7
	600	19h - 9h		
5	450	9h - 19h	90.640	7
	600	19h - 9h		
6	600	9h - 19h	73.425	10
	450	19h - 9h		
7	600	9h - 19h	72.285	11
	300	19h - 9h		

Como se seria de esperar o facto de haver uma redução considerável no volume de veículos, o valor da função objetivo diminui cerca de 3 vezes e acompanhado também do número de parques associados a cada resultado encontrado. No caso 1, como podemos verificar, é apresentado o menor valor da função objetivo, no entanto, esta solução apresenta uma peculiaridade. O Quadro 5.4 mostra que apesar de ser necessário construir 10 bolsas de estacionamento para se conseguir chegar a aquele valor da função, apenas duas funcionarão só em parte do dia, uma apenas no diurno e outra somente no noturno, ou seja, 8 das bolsas de estacionamento previstas funcionaram durante o dia inteiro.

Na Figura 5.4 e Figura 5.6 apresentam-se a distribuição geográfica final pelo mapa da região daquilo que poderia constituir uma solução tendo em conta o cenário apresentado. Como podemos verificar apenas os parques a localizar em Coimbra e em Condeixa-a-Nova funcionarão num só período, o primeiro apenas no diurno e o segundo apenas no período noturno. Na Figura 5.5

apresenta-se a distribuição de carregadores a serem instalados pelos parques implantados no horário noturno.

Quadro 5.4 - Resultados para o Caso 1 do modelo p-mediana no cenário B.

Locais de implantação	Períodos	Capacidades
Arganil	9h - 19h	359
Arganil	19h - 9h	617
Cantanhede	9h - 19h	495
Cantanhede	19h - 9h	881
Coimbra	9h - 19h	2982
Condeixa-a-Nova	19h - 9h	533
Lousã	9h - 19h	334
Lousã	19h - 9h	601
Miranda do Corvo	9h - 19h	356
Miranda do Corvo	19h - 9h	458
Montemor-o-Novo	9h - 19h	467
Montemor-o-Novo	19h - 9h	646
Penacova	9h - 19h	582
Penacova	19h - 9h	812
Soure	9h - 19h	414
Soure	19h - 9h	452
Mealhada	9h - 19h	423
Mealhada	19h - 9h	553

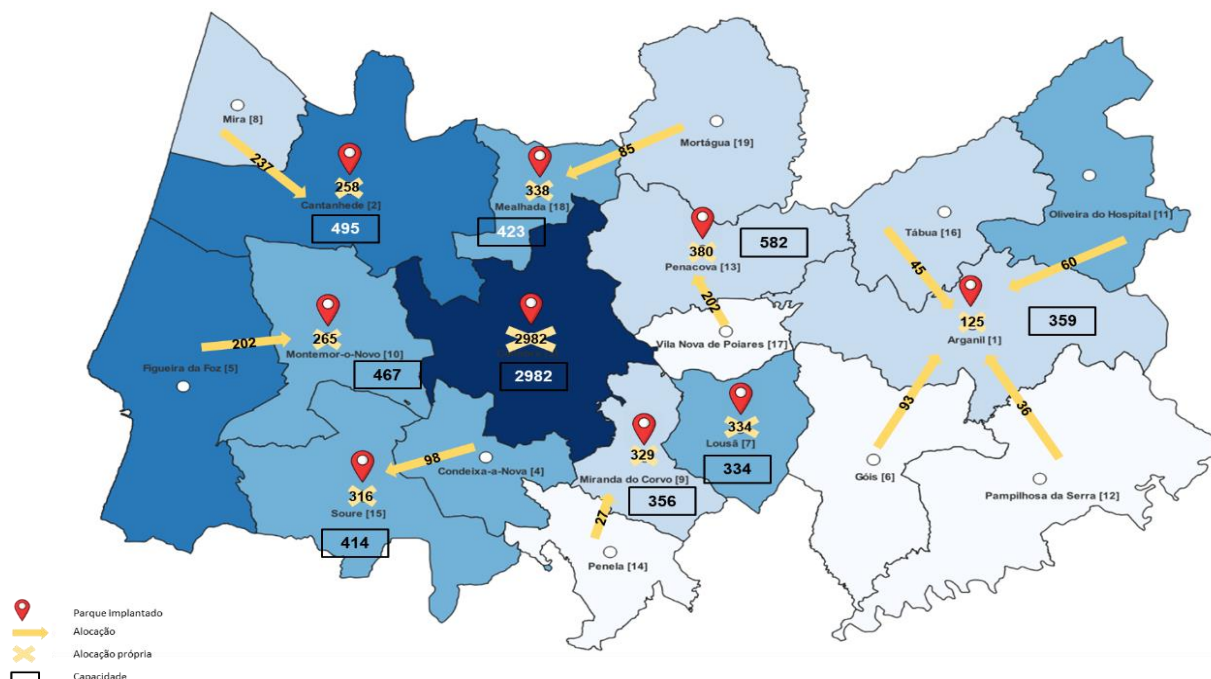


Figura 5.4 - Representação esquemática da solução ótima para o caso 1: período diurno

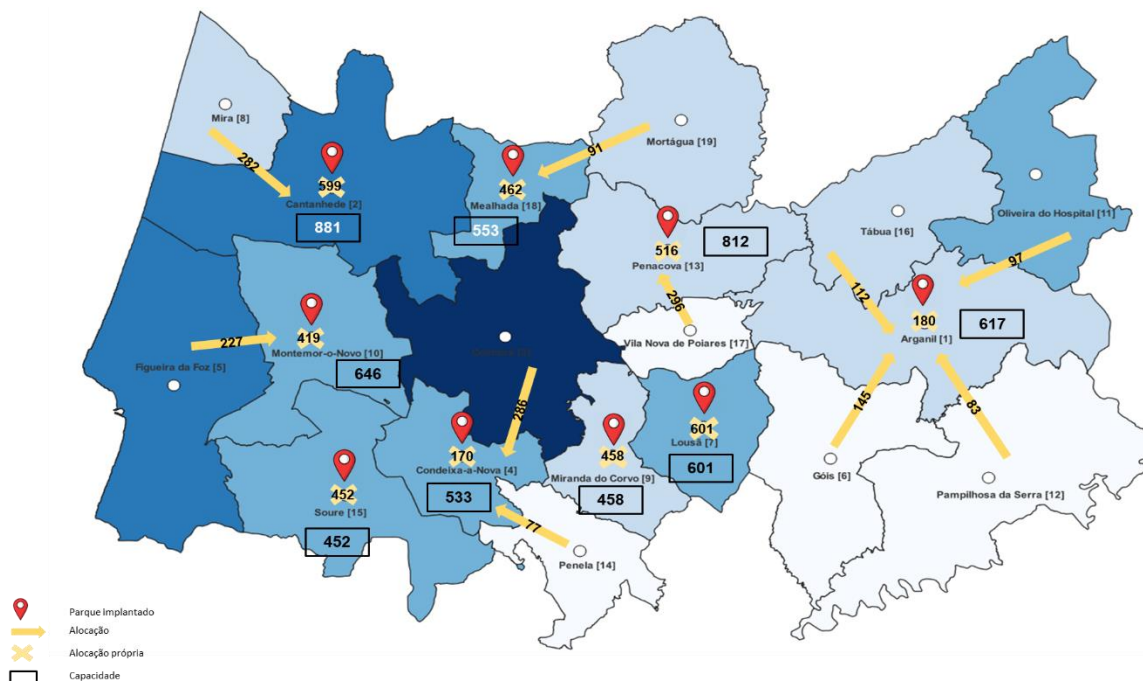


Figura 5.6 - Representação esquemática da solução ótima para o caso 1: período noturno.

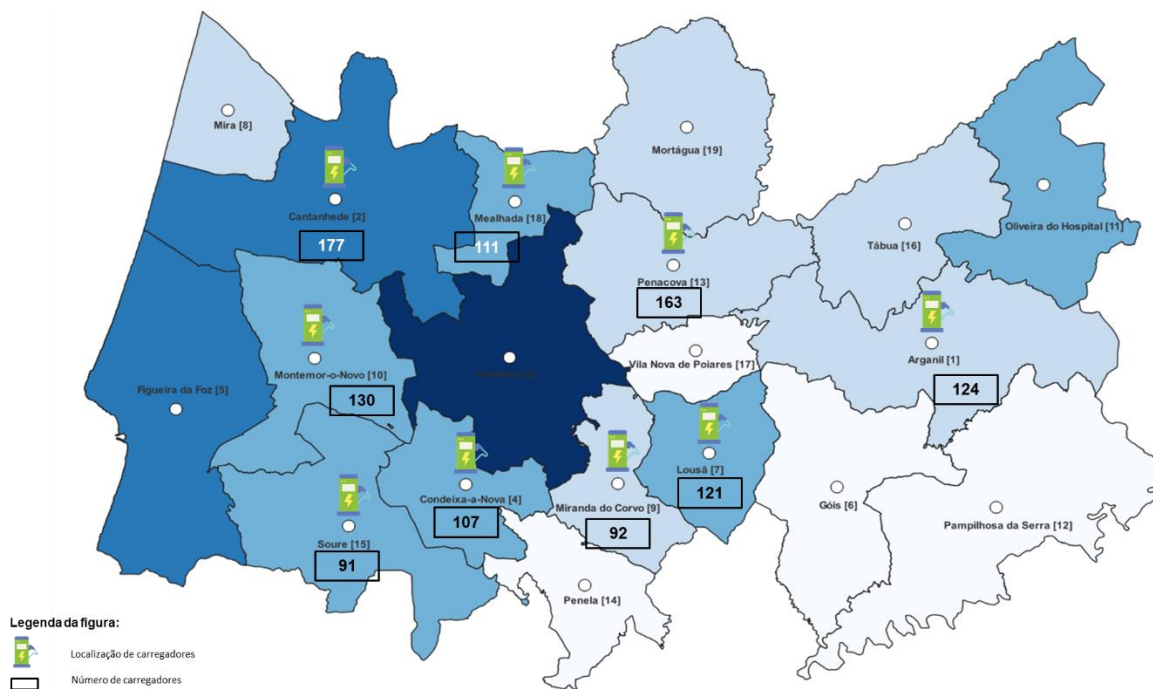


Figura 5.5 – Localização e número de carregadores para os parques no período noturno.

Apresentando os resultados fornecidos pelo modelo de custos fixos, temos em mente que este utiliza restrições de capacidades mínimas e máximas. De modo a garantir que o resultado não incluía um parque de estacionamento em cada município, são utilizadas capacidades mínimas e, por outro lado, as restrições de capacidade máxima garantem que a distribuição de parques não seja feita apenas pelos municípios em que os custos sejam consideravelmente mais baixos. Desta forma temos no Quadro 5.5 os casos analisados para o modelo em questão no cenário A.

Quadro 5.5 - Resultados para o modelo de custos no Cenário A.

Caso	Capacidades		Valor da função objetivo (€)	Nº de parques na região
1	Zmin	2500	213.269	7
	Zmax	5000		
2	Zmin	1000	194.123	13
	Zmax	2500		
3	Zmin	500	187.523	19
	Zmax	2500		
4	Zmin	1500	202.660	11
	Zmax	2500		
5	Zmin	1500	201.461	10
	Zmax	5000		
6	Zmin	1750	203.118	9
	Zmax	5000		
7	Zmin	2000	204.781	8
	Zmax	5000		

Como podemos reparar a variação de capacidades e correspondentes resultados mostra-nos que para valores limite de capacidade mínima, semelhantes aos considerados no modelo anterior, obtemos resultados em termos de número de parques a serem localizados, com semelhante nível de grandeza. Ao contrário dos resultados atrás apresentados compreende-se que o melhor resultado, tendo em conta o valor da função objetivo, não representaria uma possível distribuição admissível para a implantação dos parques de estacionamento, visto localizar um parque em todos os municípios. Assim optar-se-á pela apresentação da solução que poderá de facto ser adotada, na qual se encontra uma relação conveniente entre valor da função objetivo e o número de parques a ser localizado. Para o caso 5 temos então no Quadro 5.6 a distribuição de parques, na Figura 5.7 a representação geográfica e na Figura 5.8 a distribuição de pontos de carregamento.

Quadro 5.6 - Resultados para o Caso 5 do modelo de custos no Cenário A.

Local de Implantação	Capacidade
Cantanhede	2.111
Coimbra	9.819
Gois	1.500
Lousã	1.500
Miranda do Corvo	1.796
Montemor-o-Novo	2.289
Penacova	2.543
Soure	1.751
Mealhada	1.824
Mortágua	1.500

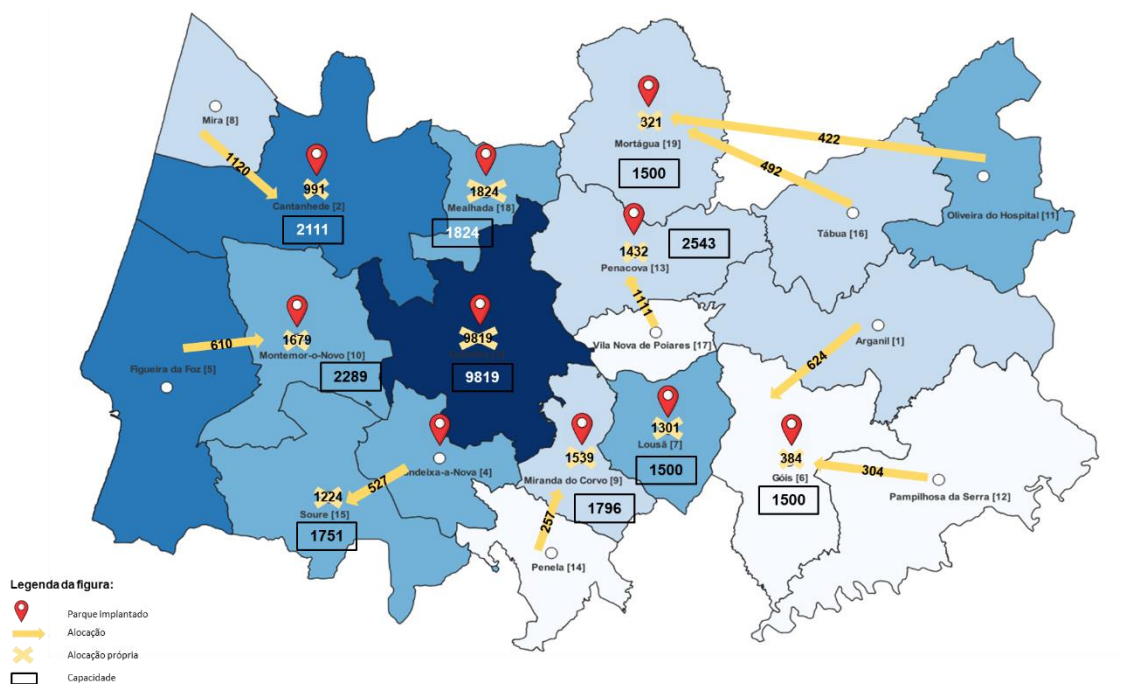


Figura 5.7 - Representação esquemática da solução ótima para o caso 5

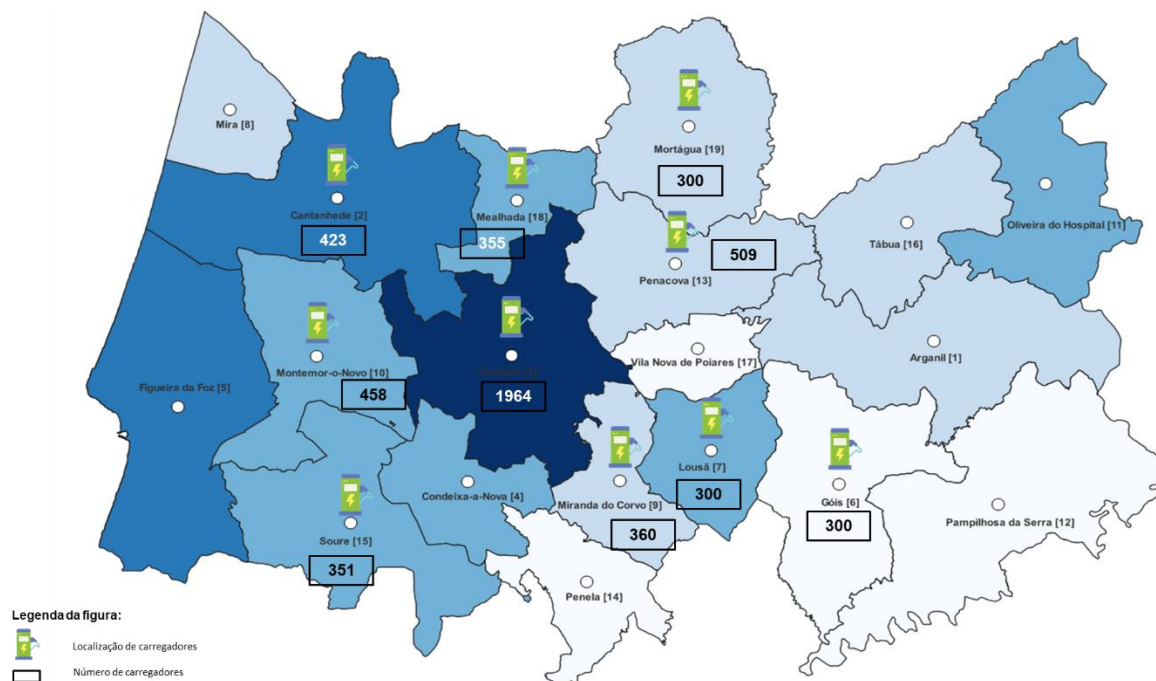


Figura 5.8 - Localização e número de carregadores para Cenário A do Caso 5 do modelo de custos.

De igual forma para o cenário B apresentam-se os seguintes resultados no Quadro 5.7:

Quadro 5.7 - Resultados para o modelo de custos no Cenário B.

Caso	Capacidades		Valor da função objetivo (€)	Nº de parques na região
1	Zmin	300	61.013	13
	Zmax	1000		
2	Zmin	600	63.189	13
	Zmax	1000		
3	Zmin	900	67.063	6
	Zmax	2000		
4	Zmin	800	66.795	7
	Zmax	1500		
5	Zmin	700	65.366	8
	Zmax	1500		

Como podemos verificar aliando menores valores de capacidades mínimas e máximas ao valor inferior da procura, conferido pelo cenário em causa, temos resultados em termos de número de parques de estacionamento a localizar semelhantes ao cenário A. Os valores da função objetivo são, como esperado, cerca de 3 vezes mais baixos, visto que a própria função é dependente das capacidades de cada parque localizado. Desta forma é apresentada na Figura 5.9 uma possível distribuição dos parques de estacionamento pela região considerando o caso 5.

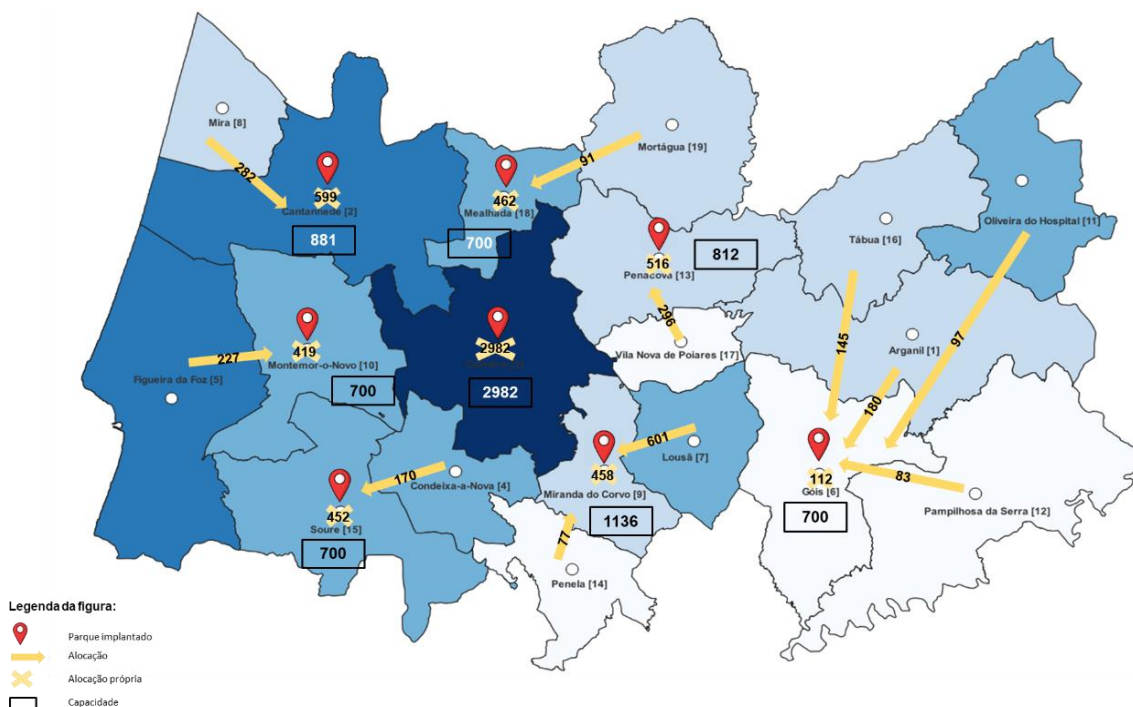


Figura 5.9 - Representação esquemática da solução ótima para o caso 5

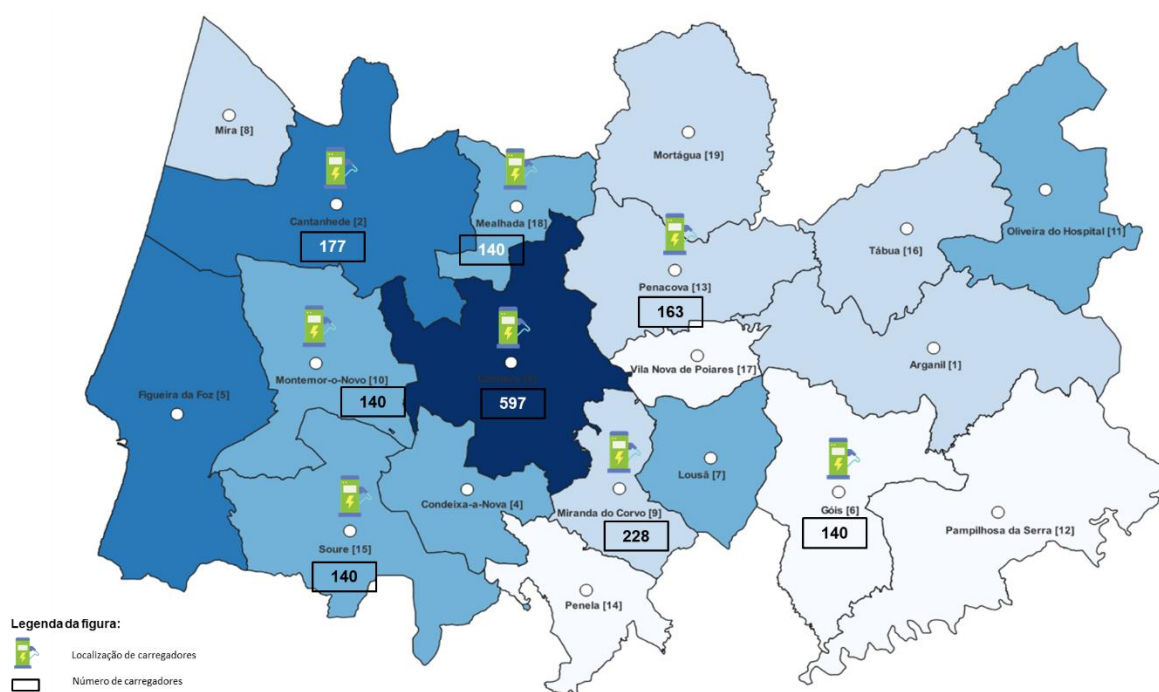


Figura 5.10 - Localização e número de carregadores para Cenário B do Caso 5 do modelo de custos

6. CONCLUSÃO

Tendo em vista a crescente necessidade de satisfazer a procura pela equidade da população, os serviços de mobilidade partilhada incorporam hoje o nosso serviço de transportes e são parte essencial do mesmo.

A evolução será natural e os sistemas de veículos autónomos partilhados (SAV) irão mais tarde ou mais cedo incorporar a nossa rede de transportes. Apesar de ser uma rara visão até à data, os sistemas SAV começam a ser testados em alguns países, como por exemplo na China com os veículos autónomos Apollo RT6 num serviço de *ride-hailing* pelo nome de Apollo GO ou os veículos Waymo testados pela Google (GT staff reporters, 2021) (Waymo, 2020).

A necessidade de estudar os impactos destes sistemas na mobilidade é algo continuamente necessário. Grande parte baseia-se em modelos de otimização ou modelos de simulação, nos quais as condições aplicadas são por vezes consideradas “ideais”, como por exemplo a análise de sistemas com grau de penetração de 100%, ou seja, um sistema isolado, ou com condições de trânsito nas quais não existem tempos de espera e demoras devido a congestionamento.

Nesta dissertação foram utilizados dois modelos de otimização com o objetivo de estabelecer a imagem daquilo que poderia ser a distribuição de parques de estacionamento para um serviço misto de veículos autónomos elétricos partilhados dentro da região de Coimbra, tendo em conta dois cenários distintos. A análise destes foi feita considerando que o sistema estaria isolado na rede de transportes e assim sendo não considerando tempos de espera ou demoras.

Comparando os resultados obtidos, verificamos relativamente ao cenário A (1 passageiro por veículo) que o volume de parques de estacionamento dado pelo valor ótimo da função objetivo fornecido no modelo p-mediana é de 11 parques enquanto o valor ótimo fornecido pelo modelo de custos para o mesmo cenário, dentro dos casos analisados, leva à implantação de 19 parques de estacionamento, ou seja, um parque em cada município. Com outra perspetiva, verifica-se para ambos os modelos e especificamente no cenário A que os piores valores das funções objetivo resultam num menor número de parques de estacionamento a serem implantados.

Para o modelo p-mediana deverão ser instalados 9 parques de estacionamento, enquanto que para ao modelo de custos são localizados 7 parques.

Acerca do cenário B (até 4 passageiros por veículo) para os valores ótimos de cada modelo verificamos que o menor número de parques a serem implantados é dado pelo modelo p-mediana, 10 parques de estacionamento e 13 parques pelo modelo de custos fixos. De igual forma ao cenário A vemos que os piores valores de função objetivo de cada modelo levam a um menor número de parques de estacionamento.

No que diz respeito ao modelo p-mediana as razões para estes valores devem-se essencialmente pelo aumento das capacidades mínimas no período diurno, no qual o município de Coimbra acolhe cerca de 51% de todo volume de carros parados. Consequentemente, deixar os restantes municípios com capacidades mínimas muito elevadas fará com que consigam receber um maior volume de veículos, mas obrigando a que parte desse volume se desloque maiores distâncias para estacionar. Outros fatores relevantes são a distribuição geográfica e demográfica dos municípios e a acessibilidade aos mesmos, ou seja, nos municípios a Este de Coimbra existe um menor volume de habitantes do que nos municípios a Oeste, mas, no entanto, estes estão mais afastados do centro da região aumentando assim distância agregada total. No modelo de custos fixos a razão já não é tão óbvia visto que existe uma componente que se relaciona com o preço da energia despendida na distância percorrida pelos veículos e outra componente que se refere ao custo de estacionamento em cada município. No entanto, e de igual forma, para maiores valores de capacidades mínimas temos valores ótimos mais elevados e também menor número de parques.

Avaliando os modelos p-mediana e de custos para cada cenário verificamos uma redução óbvia no que diz respeito aos valores de função objetivo, cerca de 3 vezes, devendo-se ao facto de ambas as funções dependerem do número de veículos parados, no entanto, no que diz respeito ao número de parques de estacionamento a serem implantados já não é tão substancial, mas tendendo de igual forma a ser inferior para o cenário B, no qual até 4 pessoas poderão partilhar um veículo.

Os resultados obtidos derivam da análise dos parâmetros escolhidos e das restrições impostas nos modelos significando assim que modelos semelhantes possam conduzir a diferentes resultados.

O pós-processamento efetuado nesta dissertação reflete apenas o número de carregadores a serem implantados única e exclusivamente caso a frota de veículos seja composta por veículos com características iguais à do veículo modelo.

Os resultados obtidos no pós-processamento realizado devem apenas ser considerados para este estudo de caso visto que as condições de análise são singulares para este trabalho e qualquer variação destes parâmetros ou adição de novos, poderão alterar os resultados obtidos.

Compreende-se que o estudo aqui realizado é uma introdução a uma análise que poderá e deverá ser futuramente alargada. A consideração de uma maior discretização no que diz respeito à área de estudo levará ao um maior leque de soluções relativamente à implementação dos parques de estacionamento. De uma outra forma, aliando à consideração anterior, a utilização de diferentes parâmetros poderá também ser interessante, como por exemplo a consideração de viagens intramunicipais.

Os modelos aplicados oferecem boas soluções para o volume de dados em uso, no entanto há espaço para utilizar outros modelos de otimização. A alteração das funções objetivo ou a escolha de outro tipo de modelo, como por exemplo modelos hierárquicos, poderá ser de interesse à análise de um estudo de caso semelhante.

Como referido anteriormente o avanço na implementação de sistemas de veículos autónomos elétricos ainda se encontra numa fase bastante embrionária e o estudo deste tema envolve uma avaliação extensiva no que diz respeito aos possíveis impactos na mobilidade e na sociedade. Compreende-se que a implementação destes sistemas será morosa, mas, no entanto, as primeiras portas foram abertas e o futuro da mobilidade evoluirá no sentido sustentável, de equidade e mostrar-se-á fundamental para o desenvolvimento da sociedade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bigotte, J. F., & Antunes, A. P. (2007). Social infrastructure planning: A location model and solution methods. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(8), 570–583. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2007.00511.x>
- BMVI. (2017). Ethics Commission Automated and Connected Driving. In *Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure*. <https://doi.org/10.1126/science.186.4158.38>
- Boloori Arabani, A., & Farahani, R. Z. (2012). Facility location dynamics: An overview of classifications and applications. *Computers and Industrial Engineering*, 62(1), 408–420. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.09.018>
- Cohen, A., & Shaheen, S. (2016). Planning for shared mobility. In *APA Planning Advisory Service Reports* (Vols. 2016-July, Issue 583). <https://doi.org/10.7922/G2NV9GDD>
- EDP. (2021). *Pagamos mais pela eletricidade em Portugal do que nos restantes Estados-membros da União Europeia?* <https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/preco-da-eletricidade-em-portugal-e-na-europa> (acedido em junho 2021)
- Emel. (2021). *Bilhete Diário*. <https://www.emel.pt/pt/onde-estacionar/via-publica/meios-de-pagamento/bilhete-diario/> (acedido em junho de 2021)
- Forrest, A., & Konca, M. (2007). Autonomous Cars and Society. *System*, 01609(508), 53. <http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-043007-205701/unrestricted/IQPOVP06B1.pdf>
- Google. (2021). *Google Maps*. <https://www.google.com/maps/?hl=pt-PT> (acedido em junho de 2021)
- GT staff reporters. (2021). *Baidu unveils new autonomous vehicle Apollo RT6*. <https://www.globaltimes.cn/page/202207/1271140.shtml> (acedido em agosto de 2022)
- Hasselwander, M., Bigotte, J. F., & Fonseca, M. (2022). Understanding platform internationalisation to predict the diffusion of new mobility services. *Research in Transportation Business and Management*, 43(October 2020), 100765. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100765>

- Hussain, R., & Zeadally, S. (2019). Autonomous Cars: Research Results, Issues, and Future Challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 21(2), 1275–1313. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2869360>
- INE. (2021). *Resultados Provisórios, Censos 2021*. https://censos.ine.pt/scripts/db_censos_2021.html (acedido em setembro de 2021)
- Insider. (2019). *Este é o primeiro veículo autónomo a circular em Portugal (e já tem seguro)*. <https://www.dinheirovivo.pt/empresas/este-e-o-primeiro-veiculo-autonomo-a-circular-em-portugal-e-ja-tem-seguro-12805283.html> (acedido em setembro de 2021)
- International Civil Aviation. (2021). *Economic Impact of Covid-19 on Civil Aviation*. <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Economic-Impacts-of-COVID-19.aspx> (acedido em setembro de 2021)
- Kistangari, R. R., Naik, S., Musunuri, P., & Srikanth, S. (2017). A Critical Review on Autonomous Vehicle. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 6(6), 507–515.
- Liljamo, T., Liimatainen, H., & Pöllänen, M. (2018). Attitudes and concerns on automated vehicles. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 59(2018), 24–44. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.08.010>
- Litman, T. (2020). Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning. *Transportation Research Board Annual Meeting*, 42(1 September 2021), 1–39.
- Milakis, D., Van Arem, B., & Van Wee, B. (2017). Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 21(4), 324–348. <https://doi.org/10.1080/15472450.2017.1291351>
- Mitchell, A. (2015). *Are we ready for Self-Driving Cars?* World Economic Forum.
- Narayanan, S., Chaniotakis, E., & Antoniou, C. (2020). Shared autonomous vehicle services: A comprehensive review. In *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* (Vol. 111, pp. 255–293). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.12.008>
- Nourinejad, M., Bahrami, S., & Roorda, M. J. (2018). Designing parking facilities for autonomous vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*, 109, 110–127. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.12.017>
- Owen, S. H., & Daskin, M. S. (1998). Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research*, 111(3), 423–447. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00186-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00186-6)

- Renault. (2021). *Driving Range, Battery & Charging*. <https://www.renault.co.uk/electric-vehicles/zoe/battery.html> (acedido em julho 2021)
- SAE International. (2018). Surface Vehicle. *SAE International*, 4970(724), 1–5.
- Santos, G. G. D., & Correia, G. H. de A. (2021). A flow-based integer programming approach to design an interurban shared automated vehicle system and assess its financial viability. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 128(May), 103092. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103092>
- Shaheen, S., Bansal, A., & Chan, N. (2017). Mobility and the sharing economy: industry developments and early understanding of impacts. In *Low Carbon Mobility for Future Cities: Principles and applications* (p. 16). https://doi.org/https://doi.org/10.1049/PBTR006E_CH10
- Shaheen, S., Chan, N., Bansal, A., & Cohen, A. (2015). *Shared Mobility. Definitions, Industry Developments, and Early Understanding*. 30.
- Shaheen, S., & Cohen, A. (2019). Shared ride services in North America: definitions, impacts, and the future of pooling. *Transport Reviews*, 39(4), 427–442. <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1497728>
- Stocker, A., & Shaheen, S. (2017). *Shared Automated Vehicles: Review of Business Models* (No. 2107–09; International Transport Forum Discussion Paper). <http://hdl.handle.net/10419/194044%0AStandard-Nutzungsbedingungen>
- Tayarani, M., Poorfakhraei, A., Nadafianshamabadi, R., & Rowangould, G. (2018). Can regional transportation and land-use planning achieve deep reductions in GHG emissions from vehicles? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 63(May), 222–235. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.05.010>
- Tesla. (2017). *O futuro da condução*. https://www.tesla.com/pt_PT/autopilot (acedido em agosto de 2022)
- Theatlantic@. (2021). *Driverless Cars of the 1920s - The Atlantic*. <https://www.theatlantic.com/technology/archive/2016/06/beep-beep/489029/> (acedido em setembro de 2021)
- TRENMO Engenharia, S. A. (2016). Plano Intermunicipal de Mobilidade e transportes da região de Coimbra. *Relatório de Caracterização e Diagnóstico., Fase 1*, 200–489.
- TSF. (2021). *Pandemia provocou quebra de 56% na procura de transportes públicos*. <https://www.tsf.pt/portugal/politica/pandemia-provocou-quebra-de-56-na-procura-de-transportes-publicos-13310895.html> (acedido em setembro de 2021)

Universidade de Coimbra. (2021). *Dados fundamentais*. <https://www.uc.pt/dados#pes> (acedido em outubro de 2021)

Waymo. (2020). *Waymo Story*. <https://waymo.com/company/#story> (acedido em setembro de 2021)

Zhao, L., & Malikopoulos, A. A. (2022). Enhanced Mobility With Connectivity and Automation: A Review of Shared Autonomous Vehicle Systems. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 14(1), 87–102. <https://doi.org/10.1109/MITS.2019.2953526>