

## **Simulador de Carregamento para Veículos Eléctricos**

**ALDO DOS ANJOS FARIA PESTANA TRINDADE**

novembro de 2018

# SIMULADOR DE CARREGAMENTO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

Aldo dos Anjos Faria Pestana Trindade



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

**2018**

(Página intencionalmente deixada em branco)

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -  
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Aldo dos Anjos Faria Pestana Trindade, Nº 1160422, 1160422@isep.ipp.pt

Orientação científica: João Soares, jan@isep.ipp.pt

Empresa: GECAD

Co-Supervisão: Fernando Lezama, fzcl@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

**2018**



(Página intencionalmente deixada em branco)



## *Agradecimentos*

Em primeiro lugar não posso deixar de agradecer ao meu orientador, Doutor João Soares pela confiança e disponibilidade que demonstrou na realização desta dissertação de mestrado, para além de fomentar ainda mais em mim o interesse pelos veículos elétricos.

Agradeço também, ao meu coorientador Doutor Fernando Lezama, pela ajuda dispensada, especialmente na parte mais científica deste trabalho.

Quero agradecer, em especial, ao Bruno Canizes pela total disponibilidade que sempre demonstrou em me ajudar e pelos seus preciosos conselhos, para além de fornecer o seu trabalho que me possibilitou realizar esta dissertação.

Agradeço aos meus pais, pelo sacrifício, motivação e paciência que demonstraram para eu conseguir chegar onde estou hoje. Sem eles nada disto seria possível.

Quero agradecer à Margarida, pela ajuda na melhoria do documento, mas também, por estar sempre do meu lado e me apoiar em todos os momentos.

Por último, deixo um abraço aos meus amigos mais próximos que me proporcionam sempre momentos de descontração e alegria.

Obrigado!



(Página intencionalmente deixada em branco)

## *Resumo*

O mundo contemporâneo vive em plena transformação. Adapta-se às necessidades que vão surgindo e preenche as falhas que o ameaçam. Vivemos um novo milénio onde as questões climáticas adquirem maior importância e, são cada vez mais críticas para a sobrevivência humana neste planeta. Neste sentido, o setor elétrico, assume um papel determinante para a conquista de um futuro melhor.

A forma como a energia é produzida e manuseada adquire novos contornos, privilegiando as fontes de energia renováveis como requisito para um planeta sustentável. Esta energia, também deverá sustentar o modo como nos movemos, substituindo idealmente uma das maiores formas de poluição existente: os meios de transporte.

Os veículos elétricos têm vindo a marcar posição no mercado automóvel de ano para ano. Isto exige um esforço e dedicação acrescidos na área científica, onde se procura responder a incertezas relativamente ao comportamento dos utilizadores deste meio de transporte, uma vez que a procura de energia terá um aumento considerável. É necessário entender em que sentido isto terá impacto nas redes de distribuição, na gestão de cargas ou de que forma a população poderá sofrer alterações no seu comportamento relativamente à interação com as fontes de energia.

Esta dissertação tem como objetivo estudar o comportamento dos utilizadores de veículos elétricos, e perceber qual o impacto que a variação dos preços da energia elétrica tem sobre os mesmos. Pretende-se entender se optar por tarifas dinâmicas possa ser compensatória em comparação com uma tarifa fixa constante.

Para atingir este objetivo foi desenvolvido uma ferramenta que simula viagens de veículos elétricos e o carregamento destes, considerando alguns comportamentos dos seus utilizadores. Os resultados demonstram que optar por uma tarifa dinâmica pode revelar-se compensatório para os utilizadores.

## *Palavras-Chave*

Veículos elétricos, mobilidade elétrica, comportamentos de carregamento, simulador, preços de energia.

(Página intencionalmente deixada em branco)

## *Abstract*

The contemporary world is in full transformation. It adapts to the needs that arise and fills the flaws that threaten it. We are living a new millennium where climate issues become more important and increasingly critical to human survival on this planet. In this sense, the electric sector plays a decisive role in the achievement of a better future.

The way energy is produced and handled takes on new contours, giving priority to renewable energy sources as a requirement for a sustainable planet. This energy, too, should support the way we move, ideally replacing one of the largest forms of pollution: transport.

Electric vehicles have been marking their position in the automotive market from year to year. This requires increased effort and dedication in the scientific area, where uncertainties regarding the behaviour of users of this means of transport are sought, as energy demand will increase considerably. It is necessary to understand in what sense this will have an impact on distribution networks, on the management of loads or on how the population may suffer changes in its behaviour regarding interaction with energy resources.

This dissertation aims to study the behaviour of electric vehicle users, and to understand the impact that the electric energy price variation has on them. The intention is to understand whether to opt for dynamic tariffs can be compensatory compared to a constant fixed tariff.

To achieve this goal, a tool was developed that simulates electric vehicle trips and their charging, considering some of their user behaviours. The results show that opting for a dynamic tariff may prove to be compensatory for users.

## ***Keywords***

Electric vehicles, electric mobility, charging behaviours, simulator, energy pricing.

(Página intencionalmente deixada em branco)

# Índice

|  |             |
|--|-------------|
| <b>AGRADECIMENTOS .....</b>                        | <b>I</b>    |
| <b>RESUMO.....</b>                                 | <b>III</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                               | <b>V</b>    |
| <b>ÍNDICE .....</b>                                | <b>VII</b>  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>                      | <b>IX</b>   |
| <b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>                      | <b>XI</b>   |
| <b>ACRÓNIMOS .....</b>                             | <b>XIII</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                         | <b>1</b>    |
| 1.1.MOTIVAÇÃO .....                                | 1           |
| 1.2.OBJETIVOS.....                                 | 2           |
| 1.3.CALENDARIZAÇÃO .....                           | 3           |
| 1.4.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....                 | 4           |
| <b>2. ENQUADRAMENTO.....</b>                       | <b>5</b>    |
| 2.1.HISTÓRIA DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS.....           | 5           |
| 2.2.MOBILIDADE ELÉTRICA .....                      | 7           |
| 2.3.SMART GRID .....                               | 9           |
| 2.4.DEMAND RESPONSE .....                          | 10          |
| 2.4.1. Demand Response nos Veículos Elétricos..... | 11          |
| 2.5.SMART CITY .....                               | 12          |
| 2.6.COMPORTAMENTOS DE CARREGAMENTO.....            | 13          |
| 2.7.FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO .....                 | 16          |
| 2.8.PREÇO DA ENERGIA ELÉTRICA.....                 | 19          |
| 2.9.SUMÁRIO .....                                  | 20          |
| <b>3. SIMULADOR.....</b>                           | <b>21</b>   |
| 3.1.PARÂMETROS .....                               | 21          |
| 3.1.1. Parâmetros do Carro.....                    | 22          |
| 3.2.ALGORITMO DO SIMULADOR.....                    | 24          |
| 3.2.1. Geração de Dados.....                       | 24          |
| 3.2.2. Simulação de Viagens.....                   | 25          |
| 3.2.3. Estações de carregamento.....               | 28          |
| 3.2.4. Decisões de Carregamento.....               | 28          |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 3.2.5.    | Preço da Energia.....  | 31        |
| <b>4.</b> | <b>ESTUDO DE CASOS .....</b>                                   | <b>33</b> |
| 4.1.      | PREÇOS FIXOS.....  | 36        |
| 4.1.1.    | Estudo de Caso 1 - Preferência pelo Preço.....                 | 36        |
| 4.1.2.    | Estudo de Caso 2 – Preferência pela distância.....             | 38        |
| 4.1.3.    | Estudo de Caso 3 – Preferência pelo tempo de carregamento..... | 40        |
| 4.2.      | PREÇOS DINÂMICOS — LMPs .....                                  | 41        |
| 4.2.1.    | Estudo de Caso 1 – Preferência pelo preço.....                 | 41        |
| 4.2.2.    | Estudo de Caso 2 – Preferência pela distância.....             | 43        |
| 4.2.3.    | Estudo de Caso 3 – Preferência pelo tempo de carregamento..... | 45        |
| 4.2.4.    | Estudo de Caso 4 – População de 2500 VEs.....                  | 46        |
| 4.2.5.    | Estudo de Caso 5 – População de 7000 VEs.....                  | 48        |
| 4.2.6.    | Síntese de Resultados — LMPs.....                              | 49        |
| 4.3.      | PREÇOS FIXOS VS. PREÇOS VARIÁVEIS .....                        | 51        |
| 4.3.1.    | População de 5000 VEs.....                                     | 51        |
| 4.3.2.    | População de 2500 VEs.....                                     | 53        |
| 4.3.3.    | População de 7000 VEs.....                                     | 55        |
| <b>5.</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>  | <b>57</b> |
| 5.1.      | CONCLUSÕES FINAIS.....   | 57        |
| 5.2.      | TRABALHOS FUTUROS .....  | 59        |
| 5.3.      | CONTRIBUTOS .....  | 60        |
|           | <b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS .....</b>                           | <b>61</b> |

## *Índice de Figuras*

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 1  | – Calendarização da dissertação                                      | 4  |
| Figura 2  | – Número de VEs nas regiões mais importantes                         | 7  |
| Figura 3  | – Stock global de VEs nos cenários New Policies e EV30@30            | 8  |
| Figura 4  | - Exemplo de preços TOU, RTP e tarifa fixa                           | 11 |
| Figura 5  | - Crescimento da população nas urbanizações                          | 12 |
| Figura 6  | – Histograma da frequência do tempo de início do carregamento        | 14 |
| Figura 7  | – Impacto do carregamento em casa (agregado)                         | 15 |
| Figura 8  | – Fluxograma do algoritmo da simulação das viagens                   | 27 |
| Figura 9  | – Fluxograma da escolha de estação de carregamento                   | 30 |
| Figura 10 | – Topologia da rede da cidade  | 34 |
| Figura 11 | – Topologia da cidade  | 34 |
| Figura 12 | – Aderência dos utilizadores às estações de carregamento - Preço     | 37 |
| Figura 13 | – Energia carregada por período nas ECs e nas casas (C.1)            | 38 |
| Figura 14 | - Aderência dos utilizadores às estações de carregamento (Distância) | 39 |
| Figura 15 | - Energia carregada por período nas ECs e nas casas (C.2)            | 39 |
| Figura 16 | - Aderência dos utilizadores às estações de carregamento (Tempo)     | 40 |
| Figura 17 | - Energia carregada por período nas ECs e nas casas (C.3)            | 41 |
| Figura 18 | – Energia carregada por período nas ECs e nas casas (C.2.1)          | 42 |
| Figura 19 | - Energia carregada por período nas ECs (C.2.1)                      | 42 |



|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 20 | – Preços da energia nas EC por período (C.2.1.)                       | 43 |
| Figura 21 | – Energia carregada por período nas ECs (C.2.2)                       | 43 |
| Figura 22 | - Preços da energia nas EC por período (C.2.2)                        | 44 |
| Figura 23 | - Preços da energia nas EC por período 2 (C.2.2)                      | 44 |
| Figura 24 | - Energia carregada por período nas ECs (C.2.3)                       | 45 |
| Figura 25 | - Preços da energia nas EC por período (C.2.3)                        | 45 |
| Figura 26 | – Preços da energia nas EC por período – Preço (C.2.4)                | 47 |
| Figura 27 | - Preços da energia nas EC por período – Distância (C.2.4)            | 47 |
| Figura 28 | - Preços da energia nas EC por período – Tempo (C.2.4)                | 48 |
| Figura 29 | – Preço da energia nas EC por período 1 (C.2.5)                       | 49 |
| Figura 30 | – Preço da energia nas EC por período 2 (C.2.5)                       | 49 |
| Figura 31 | – Aderência às EC consoante a preferência                             | 50 |
| Figura 32 | - Aderência às EC consoante a preferência 2                           | 50 |
| Figura 33 | – Energia total e média carregada para cada preferência               | 51 |
| Figura 34 | – Análise de sensibilidade para a preferência do preço (5000 VEs)     | 52 |
| Figura 35 | - Análise de sensibilidade para a preferência de distância (5000 VEs) | 52 |
| Figura 36 | - Análise de sensibilidade para a preferência de preço (2500 VEs)     | 53 |
| Figura 37 | - Análise de sensibilidade para a preferência de distância (2500 VEs) | 54 |
| Figura 38 | - Análise de sensibilidade para a preferência de tempo (2500 VEs)     | 54 |
| Figura 39 | - Análise de sensibilidade para a preferência de preço (7000 VEs)     | 55 |

## *Índice de Tabelas*

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tabela 1  | - Resumo das ferramentas estudadas                | 18 |
| Tabela 2  | - Parâmetros globais do simulador                 | 22 |
| Tabela 3  | - Parâmetros do perfil de utilizador              | 23 |
| Tabela 4  | - Parâmetros do modelo do veículo elétrico        | 24 |
| Tabela 5  | - Modelos de VEs utilizados nos casos de estudo   | 35 |
| Tabela 6  | - Preços fixos da energia                         | 36 |
| Tabela 7  | - Pesos para Caso de Estudo 1                     | 36 |
| Tabela 8  | - Pesos para o Caso de Estudo 2                   | 38 |
| Tabela 9  | - Pesos para o Caso de Estudo 3                   | 40 |
| Tabela 10 | - Preços da energia elevados nos períodos de pico | 46 |

(Página intencionalmente deixada em branco)

## *Acrónimos*

|      |   |   |
|------|---|---|
| BEV  | – | Battery Electric Vehicle                |
| DR   | – | Demand Response                         |
| FER  | – | Fontes de Energia Renovável             |
| IPA  | – | Interfaces de Programação de Aplicações |
| LMP  | – | Locational Marginal Prices              |
| PD   | – | Produção Distribuída                    |
| PHEV | – | Plug-In Electric Vehicle                |
| RTP  | – | Real Time Pricing                       |
| SC   | – | Smart Charging                          |
| SG   | – | Smart Grid                              |
| SoC  | – | State of Charge                         |
| SUMO | – | Simulation of Urban MObility            |
| TIC  | – | Tecnologias de Informação e Comunicação |
| TOU  | – | Time of Use                             |
| V2G  | – | Vehicle to Grid                         |
| VE   | – | Veículo Elétrico                        |

(Página intencionalmente deixada em branco)

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. MOTIVAÇÃO

A necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa é cada vez maior. O Acordo de Paris, anunciado em dezembro de 2015, visa limitar o aumento da temperatura média global a menos de 2° Celsius acima dos níveis pré-industriais [1]. O setor dos transportes representa 23% das emissões de gases com efeito de estufa, sendo apenas superado pelas emissões de combustíveis fósseis (por exemplo, produção de energia) [2]. Isso revela que a eletrificação do transporte desempenha um papel significativo em tornar o planeta um lugar mais verde, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

A utilização de veículos elétricos (VEs) não só apresenta potencial na alteração da mobilidade individual, bem como na redução de emissões de poluentes que é considerada uma das principais causas da poluição do ar e responsável por graves problemas de saúde na população. No entanto, como as cargas carregadas crescentes serão, idealmente cobertas pela produção renovável para alcançar a descarbonização do setor de transporte, a introdução de preços dinâmicos da eletricidade poderia aumentar o risco de sobrecargas de subestações [3]. Na Europa, o crescimento do uso de VEs resultará numa procura extra de energia, com o seu consumo a aumentar de aproximadamente 0,03% em 2014 para 9,5% em 2050 [4].

A ascensão do carro elétrico implica desafios e levanta questões que deverão ser estudados aprofundadamente para se obter o melhor desta tecnologia, nomeadamente a nível da gestão das cargas, uma vez que o seu aumento irá trazer obstáculos na rede elétrica.

Num modo geral, a população está habituada a lidar com as energias fósseis e com a facilidade que conseguem em encontrar uma estação de serviço que permite abastecer os seus veículos, rapidamente e sem constituir qualquer incómodo. Isto é, não existem preocupações no que respeita ao tempo de espera nem preocupações inerentes ao combustível necessário para chegar ao destino previsto. Perante um VE, é importante considerar estes fatores. Além disso, existem outros desafios como o aumento da procura de energia de pico se os eventos de carregamento ocorrerem no mesmo instante que os horários de pico [5].

A presente dissertação centra-se na relação da utilização dos veículos elétricos com a rede de energia elétrica. A rede reage consoante o nível de cargas que nela ficam ligadas, e com um afluente crescido deste meio de transporte no futuro, torna-se necessário estudar como os impactos da energia extra podem ser mitigados. Entender o comportamento dos utilizadores dos veículos elétricos perante as mudanças na rede será uma peça fundamental.

## **1.2. OBJETIVOS**

Estudos recentes, sugerem que os preços dinâmicos da eletricidade podem propagar a procura e ajudar as operadoras a evitar investimentos dispendiosos em infraestruturas [6]. Contudo, a falta de variabilidade nos preços da eletricidade não permite que os estudos sejam, completamente realistas. Nesse contexto, torna-se importante abordar a principal questão de investigação:

*Poderão os utilizadores de Veículos Elétricos alterar os seus padrões de carregamento, como consequência da variação dos preços da eletricidade?*

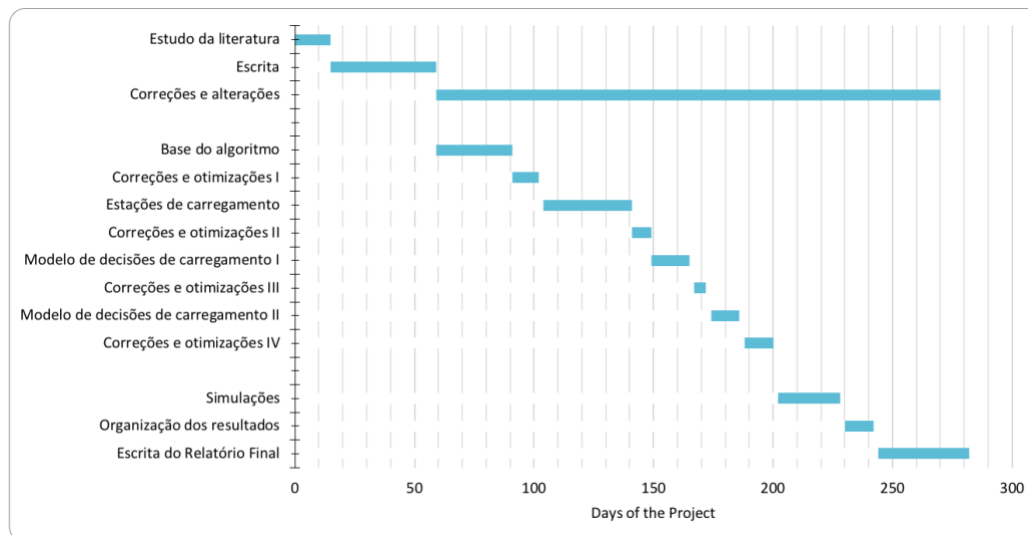
Alguns objetivos precisam ser cumpridos para que seja possível responder a esta questão, nomeadamente:

- Analisar o comportamento dos utilizadores dos veículos elétricos – quando e como são carregados os seus veículos e, de que forma podem interagir com a bateria, entre outros recursos energéticos;
- Aplicar os seus padrões de utilização para criar modelos de condução – simular viagens, comportamentos na forma de carregamento, entre outros;
  - Implementar um algoritmo em R para simular viagens desde um ponto (casa) para um conjunto determinado de destinos e regressar;
  - Criar diferentes tipos de condutores e veículos que possam também constituir diferentes destinos e horários;
  - Definir com alguma precisão as posições dos “objetos” na *Smart City*.
- Implementar estações de carregamento no algoritmo, onde os utilizadores terão de tomar decisões perante o respetivo carregamento, ou seja, se carregam ou não, de acordo com os comportamentos previamente analisados. Para tanto, é simulado um carregamento inteligente considerando variáveis como a distância e o preço da eletricidade;
- Avaliar o impacto na variação dos preços da eletricidade.

### **1.3. CALENDARIZAÇÃO**

A realização do estudo para o desenvolvimento da ferramenta de simulação, no âmbito de estágio curricular numa unidade de investigação com sede no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), teve a duração de aproximadamente dez meses. A sua concretização conduziu à calendarização apresentada na Figura 1.





**Figura 1 – Calendarização da dissertação**

## 1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Para além da Introdução, esta dissertação contém mais 4 capítulos. O capítulo 2 destina-se à apresentação de conceitos relacionados com os veículos elétricos, *Smart Grids* e casos de estudo de trabalhos que foram desenvolvidos por diversos autores.

Em seguida, no capítulo 3, é descrito o programa desenvolvido no âmbito deste projeto. Ainda neste capítulo, são detalhados os parâmetros do simulador, bem como a estrutura do algoritmo e o respetivo funcionamento.

O Capítulo 4 é referente aos casos de estudo, onde foram realizadas várias simulações utilizando preços fixos e preços dinâmicos, de forma a estudar os comportamentos dos utilizadores dos VEs.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais e trabalhos futuros.

## 2. ENQUADRAMENTO

### 2.1. HISTÓRIA DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

O carro elétrico pode parecer uma recente invenção tecnológica, considerando a sua ascensão gradual no mercado automóvel e, especialmente se o associarmos às constantes inovações tecnológicas. No entanto, essa percepção está completamente errada. Na realidade, o veículo elétrico é tão, ou mais, antigo que o carro a combustão.

Ferdinand Porsche, um nome facilmente reconhecido na indústria automóvel explica-nos o aparecimento do veículo elétrico. Desde muito cedo o interesse pela área elétrica e aos 14 anos de idade já desenvolvia experimentos com a eletricidade. Mais tarde, começou a trabalhar na empresa elétrica *Bela Egger & Co.* em Viena e, em 1897, construiu um motor elétrico de roda (*electric wheel-hub motor*), que foi, essencialmente um motor elétrico embutido numa roda. Depois, iniciou um trabalho na *Jacob Lohner & Co.* integrando o “Departamento do Carro Elétrico” Nesse mesmo ano, a empresa apresentou um carro elétrico puro, usando os motores desenhados por Porsche. Embora este não fosse oficialmente um carro da famosa marca Porsche (terá sido *Lohner-Porsche*). O primeiro carro que Ferdinand Porsche desenhcou era elétrico e não a combustão.

O carro elétrico apresentava algumas vantagens. Não tinha vibração, cheiro e ruído como estaria associado aos carros a gasolina. A parte mais difícil na condução do carro a gasolina era a troca de mudanças, o que não existia no carro elétrico [7]. Além disso, para se poder ligar o carro a gasolina era necessário dar a volta a uma manivela.

Foram vários os fatores que influenciaram na ascensão do carro a combustão e poucos os que contribuíram para o uso do carro elétrico. Primeiramente, o preço do petróleo era muito barato. Os Estados Unidos foram por mais de uma década o maior produtor de petróleo do mundo. Ao mesmo tempo, a eletricidade em 1910 ainda era escassa, e a que existia era gerada através de combustíveis fósseis (por exemplo, a óleo). O abastecimento de um carro a combustão é direto e rápido. Considerando o modo como a energia elétrica era gerada, o abastecimento de um carro elétrico envolvia um processo mais longo, desde como é produzida a energia até o momento exato em que o veículo é carregado.

Além disso, havia necessidade em expandir a rede rodoviária. Em 1908, Henry Ford lançou o *Ford Model T*, considerado o primeiro carro a preço acessível. Com uma produção de 14.689.525 carros entre 1909 e 1927, surgiu a necessidade em melhorar as estradas de forma a permitir uma melhor circulação [8]. Um exemplo é a *Lincoln Highway*, construída em 1913, com mais de 5000 km [9]. Se alguém pretende-se ir de Nova York a São Francisco utilizando um carro elétrico, seriam necessários cerca de 100 carregamentos noturnos. Além disso, não existiam infraestruturas necessárias para permitir o carregamento de carros elétricos neste intervalo de distâncias.

Depois, em terceiro, a evolução das tecnologias dos motores de combustão interna. Um dos grandes inconvenientes do carro a combustão era a necessidade de usar uma manivela para alimentar o carro. A solução deste problema surgiu através de Charles Kettering, que inventou a ignição elétrica [10].

Por fim, o último fator a considerar para o insucesso do carro elétrico era o seu preço. Como dito anteriormente, o lançamento do *Ford Model T* foi um enorme sucesso devido ao seu preço acessível que permitiu ao comum cidadão possuir um carro. O preço de um carro elétrico era até três vezes superior [11]. Além disso, só a substituição da bateria custava tanto quanto um carro a combustão.

## 2.2. MOBILIDADE ELÉTRICA

Em 2017 o número de VEs a circular nas estradas foi de cerca de 3.1 milhões, um aumento de 57% em relação a 2016 (conforme Figura 2). Este aumento foi semelhante ao registado entre 2015 e 2016, de 60% [12]. É possível ainda verificar que os veículos puramente elétricos (BEV<sup>1</sup>), tiveram um crescimento maior que os veículos híbridos (PHEV<sup>2</sup>), representando dois terços do total. A China é o país com a maior fatia, representando 40% do total.

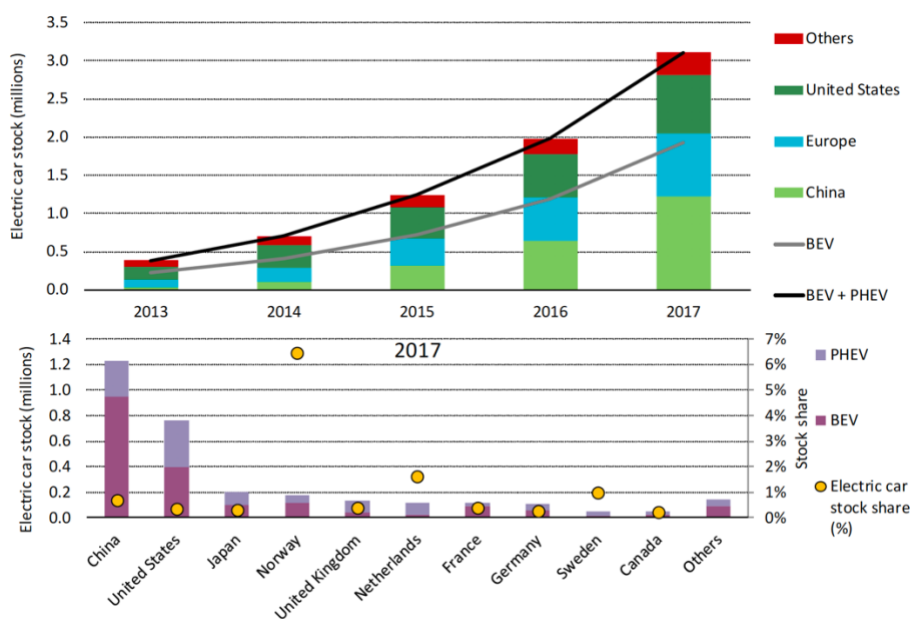
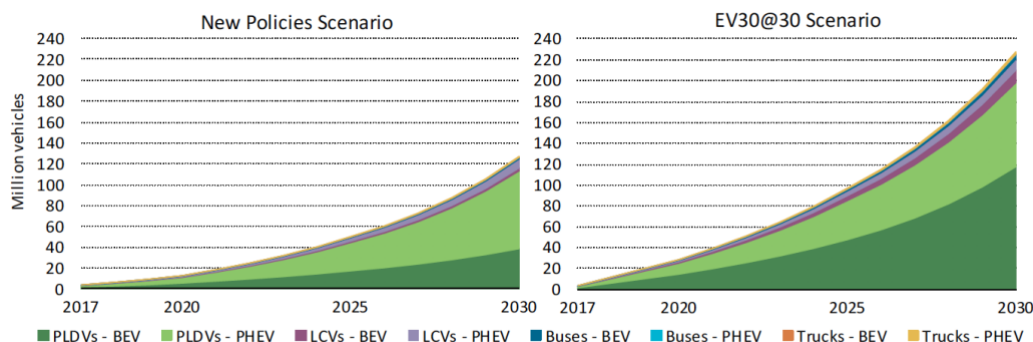


Figura 2 – Número de VEs nas regiões mais importantes [12]

O Global EV Outlook 2018 [12] define dois cenários para adoção de VEs até 2030 (Figura 3). O primeiro, “*New Policies Scenario*”, assume uma adoção constante de acordo com as políticas atuais e futuras, enquanto que o segundo, “*EV30@30 Scenario*”, representa o melhor cenário possível, em que os países excedem as metas de produção de veículos elétricos. No último, o número de VEs a circular nas estradas poderia atingir os 228 milhões.

<sup>1</sup> Do inglês: *Battery Electric Vehicle*

<sup>2</sup> Do inglês: *Plug-In Battery Electric Vehicle*



**Figura 3 – Stock global de VEs nos cenários New Policies e EV30@30 [12]**

Com a popularidade dos VEs a aumentar, surge a necessidade de melhorar as infraestruturas de carregamento e oferecer modelos mais acessíveis. Apesar dos governos oferecerem incentivos para a adoção de VEs e continuarem a investir nas infraestruturas, os motivos que levam as populações a optar por este meio de transporte são cada vez mais evidentes: é a solução mais limpa que irá ajudar a sustentar um planeta habitável.

Isto reflete-se na satisfação dos utilizadores de VEs, em que 51% afirmam que o maior incentivo para a compra de um, é o facto de contribuírem para um futuro mais sustentável [13]. No geral, os resultados mostram que esta adoção não depende apenas de incentivos, mas também de existirem menos obstáculos para uma condução mais confortável.

Neste sentido, torna-se fundamental que o carregamento seja acessível. É importante existirem estações de carregamento nos centros comerciais, parques de estacionamento, no trabalho e em casa. Outro aspeto a considerar é o tipo de carregamento, uma vez que o tempo é, talvez, a variável que o consumidor mais valoriza. A potência de carregamento elevada dos carregadores rápidos (Corrente Contínua maior que 40 kW), dificulta a sua implementação nas residências habitacionais, devido a questões técnicas, que apesar de serem concebíveis, ainda estão pouco desenvolvidas. Nesta perspetiva, a implementação de estações de carregamento (EC) rápido irá facilitar o utilizador, reduzindo os tempos de espera.

## 2.3. SMART GRID

Grande parte da infraestrutura do sistema de energia existente remonta aos anos 50 ou mesmo antes, o que se traduz numa infraestrutura envelhecida e com pouco investimento para aquilo que são as necessidades atuais. Entre as diversas deficiências da rede tradicional encontram-se a falta de análise automatizada, interruptores mecânicos que causam tempos de resposta lentos ou pouca visibilidade.

Os períodos de maior procura de energia levam a rede elétrica a ficar mais sobrecarregada. Isto acontece em períodos já conhecidos e na maioria das vezes é possível prever o nível das cargas, através de registos históricos, por exemplo. No verão e no inverno a rede também tende a ficar com maior nível de *stress*, uma vez que o calor e o frio fazem as pessoas procurar soluções para arrefecer ou aquecer, aumentando o consumo de energia significativamente. Nos últimos anos, para além disto, tem havido uma subida da procura de energia devido à proliferação de produtos eletrónicos, como computadores e telemóveis.

A Produção Distribuída (PD), apesar de ter impactos positivos na rede elétrica, como a redução de fluxos na rede, que consequentemente reduzem as perdas, tem também impactos bastante negativos. Altos níveis de penetração de energia podem provocar flutuações na tensão ou potência, harmónicos, correntes de defeito e problemas de terra. Ainda mais, a energia fotovoltaica e eólica tem uma produção imprevisível e intermitente, provocando também grandes problemas de estabilidade na frequência e tensão.

Como a energia não pode ser armazenada em grande escala, os principais produtores têm de atender aos aumentos da procura com mais geração. Uma parte da produção de energia vem de centrais elétricas projetadas para trabalhar a tempo inteiro, consolidando a procura. O resto são centrais de reserva, preparadas para entrarem em serviço nas alturas de maior procura. Estas centrais são tipicamente mais dispendiosas, traduzindo a sua operação em disparidades nos custos de produção ao longo do ano.

Neste sentido, existe uma necessidade acrescida de tornar a rede elétrica mais eficiente e sustentável. Nos últimos anos tem surgido o conceito de *Smart Grids* (SG) – redes inteligentes. *Smart Grid* é um conceito de infraestrutura em tempo real dinamicamente interativo que engloba as muitas visões de diversas partes interessadas do sistema de energia [14].

As *Smart Grids* são um componente essencial das estratégias para um futuro energético sustentável. Além de facilitar a integração das fontes de energia renováveis e a eletrificação do transporte, permitem também novos serviços de valor acrescentado relacionados com a energia. A integração de fontes de energia renovável (FER), reduzindo as perdas e aumentando a fiabilidade, eficiência e segurança do abastecimento de eletricidade aos consumidores são algumas das melhorias que as SG podem introduzir [15].

## 2.4. DEMAND RESPONSE

Normalmente, o mercado energético funciona segundo o princípio de procura e oferta, ou seja, os efeitos da interação entre estes dois conceitos, reflete-se no preço da energia. De modo geral, a grande procura e baixa oferta fazem aumentar o preço. Em contraste, quanto maior a oferta e menor a procura, o preço tende a diminuir. Com o aumento das FER, a produção de energia vai depender em parte das condições climáticas e, consequentemente, a oferta não vai conseguir sempre atender à procura.

Neste sentido, seria mais eficiente adaptar a procura de energia à oferta das FER. Para isso é necessário que os consumidores sejam mais flexíveis, e que sejam capazes de reduzir o consumo de energia nas horas de ponta, ou mudar esse consumo para períodos de menor procura ou com maior produção de FER. Estes tipos de atividades são designados de *Demand Response*<sup>3</sup> (DR). O DR permite aos consumidores reduzir, voluntariamente, a sua procura de energia, em troca de benefícios relativamente aos preços praticados no mercado grossista, como resultado das suas ações.

A Comissão Federal Regulatória de Energia dos Estados Unidos (FERC), define a DR como: *“Mudanças na utilização de energia elétrica pelos consumidores finais, dos seus padrões de consumo normal em resposta a mudanças no preço da eletricidade ao longo do tempo, ou pagamentos de incentivos destinados a induzir menor uso de eletricidade em alturas de preços altos no mercado grossista ou quando a fiabilidade do sistema é comprometida”*<sup>4</sup> [16]. A DR facilita a redução da energia consumida, ajuda a poupar energia e maximiza a capacidade de utilização das infraestruturas dos sistemas de distribuição ao reduzir a necessidade de construção de novas linhas.

---

<sup>3</sup> Resposta ativa de carga

<sup>4</sup> Tradução livre do inglês

#### 2.4.1. DEMAND RESPONSE NOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Existem várias estratégias de preço podem ser consideradas, como o *Time of Use* (TOU), *Real Time Pricing* (RTP), Smart Charging (SC) e Vehicle to Grid (V2G). A Figura 4 mostra um exemplo destas estratégias de preço. A tarifa fixa é uma tarifa que os consumidores vão utilizar sempre independente do período do dia. A abordagem TOU, apresenta tarifas diferentes para os períodos de maior e menor procura de energia, sendo elas mais altas ou mais baixas respetivamente. Desta forma incentiva-se o utilizador a carregar em períodos de menos consumo de energia e assim reduzir o número de cargas nos períodos de pico, promovendo o equilíbrio entre a oferta e a procura. A estratégia RTP reflete o valor marginal contínuo de eletricidade de acordo com as mudanças em tempo real no mercado de energia. Os preços não são predeterminados e estão sujeitos a mudanças de hora a hora.

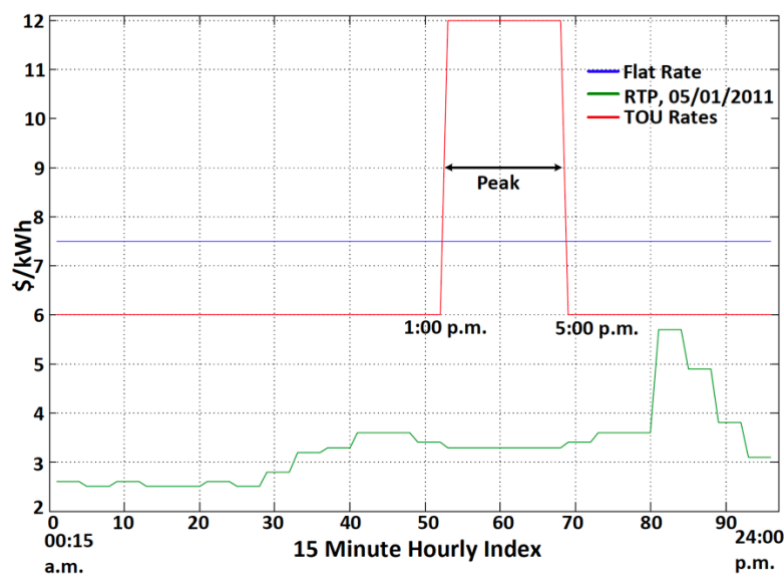


Figura 4 - Exemplo de preços TOU, RTP e tarifa fixa [17]

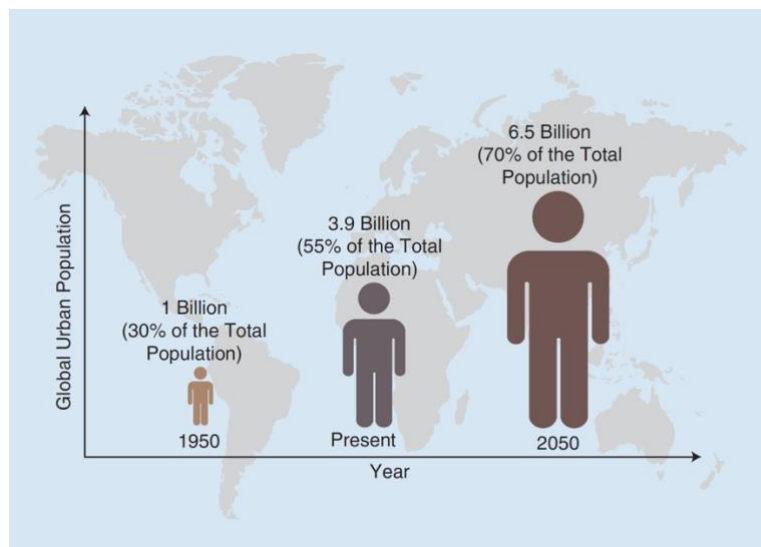
O *Smart Charging* de VEs permite aos utilizadores e operadores das redes calendarizar perfis de carregamento de forma a obter benefícios técnicos e económicos, ou seja, o *Smart Charging* procura controlar as cargas continuamente e, pode ser programado com otimização ou, com algoritmos heurísticos para atingir alguns objetivos de como evitar saturação dos transformadores e das linhas, bem como reduzir as emissões de gases ou minimizar os custos



de produção [18]. O conceito V2G parte do princípio em que o VE passa a não ser apenas uma carga, mas também uma fonte de energia. Desta forma o veículo passa a injetar energia na rede, atuando como gerador de distribuição ou sistemas de armazenamento [19]. Assim, é possível os utilizadores de VEs fornecerem serviços auxiliares de estabilização da rede, como a manutenção da frequência ou a venda de energia à rede quando economicamente viável.

## 2.5. SMART CITY

Cada vez mais, as pessoas escolhem as grandes cidades como local de residência. Segundo as Nações Unidas, atualmente 55% da população mundial reside em áreas urbanas, número que se espera aumentar para 68% até 2050 (Figura 5). Projeções mostram que a urbanização, a mudança gradual na residência da população das áreas rurais para as áreas urbanas, em conjunto com o crescimento global da população mundial, poderia acrescentar 2500 milhões de pessoas às áreas urbanas até 2050 [20]. Estas alterações justificam uma melhor eficiência na utilização dos recursos disponíveis nas áreas urbanas.



**Figura 5 - Crescimento da população nas urbanizações [21]**

Não existe uma definição estabelecida sobre o que é uma *Smart City*. Uma cidade inteligente é um centro urbano que integra várias soluções inovadoras de forma a melhorar o

desempenho de toda a infraestrutura, utilizando dados e tecnologias que permitam a todas as partes interessadas criarem cidades sustentáveis [21]. A *Smart City* usa Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), para melhorar a habitabilidade, funcionalidade e sustentabilidade [Smart Cities Council 2014]. De uma cidade inteligente fazem parte vários elementos inteligentes. A utilização de aplicações de TIC e componentes digitais, como sensores ou telemóveis, são normalmente os meios essenciais para perceber a inteligência em qualquer domínio da *Smart City* [22]. Ao mesmo tempo, a utilização destes componentes inteligentes, por si só, não torna uma cidade, inteligente. Para isso é necessário considerar a interligação destes componentes [22]. A partilha de informação entre todos estes componentes é o principal fator fundamental para a consolidação de uma *Smart City*.

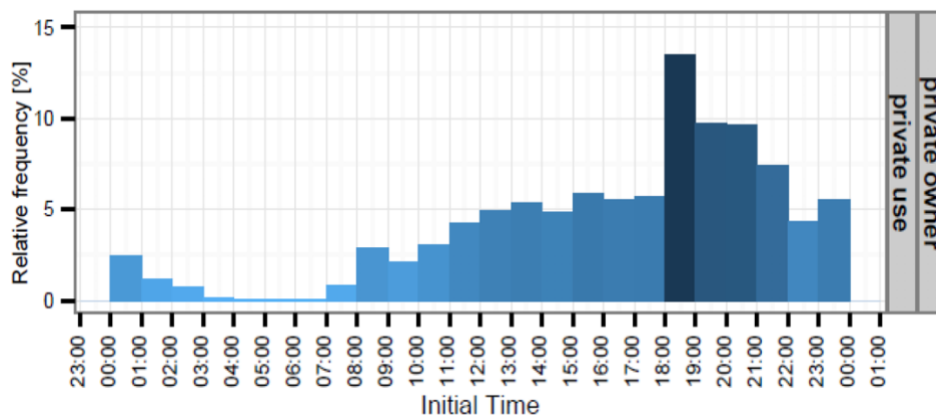
Este conceito pode ser aplicado a várias áreas existentes numa cidade [23]:

- Edifícios inteligentes – edifícios que incorporem as vantagens de comunicação e controlo de sistemas;
- Educação e cuidados sociais e médicos – aplicações que permitam melhorar estas atividades, assegurando a todos os cidadãos um serviço de alta qualidade;
- Gestão de águas – gestão inteligente dos sistemas de distribuição de águas e resíduos;
- Estacionamento inteligente – gestão dos parques de estacionamento utilizando sensores e CCTV;
- Transporte inteligente – monitorização do tráfego e otimização em tempo real, minimizando o impacto no ambiente;
- Energia inteligente – sistemas de energia elétrica inteligentes, entre eles as *Smart Grids*, iluminação inteligente, contadores inteligentes e otimização das operações da rede.

## **2.6. COMPORTAMENTOS DE CARREGAMENTO**

Os sistemas de gestão das redes elétricas estão altamente dependentes do aumento da penetração de energia na rede proveniente dos VEs. Esta energia torna-se ainda mais complexa de gerir devido à sua incerteza. O foco deverá ser dado ao comportamento dos utilizadores dos VEs, uma vez que existem vários fatores que o influenciam, nomeadamente, a autonomia, o custo e, o tempo de carregamento.

Entre 2011 e 2013 foram recolhidos dados sobre padrões de condução e carregamento de VEs, num estudo realizado na Europa [24]. Foram registados mais de 230,000 carregamentos. A média do estado da bateria (SoC) quando foram iniciados os carregamentos era de 60%, o que mostra que os utilizadores não deixam a bateria descarregar, ligando-se à rede sempre que têm oportunidade e não quando a bateria está baixa. Aliás, a percentagem média de utilizadores que iniciaram uma viagem ou um carregamento com um nível de SoC inferior a 20% é menor que 5%. Relativamente ao momento dos carregamentos, verifica-se que a maioria são realizados entre as 18:00h e 22:00h (Figura 6), o que corresponde às horas de ponta de energia.



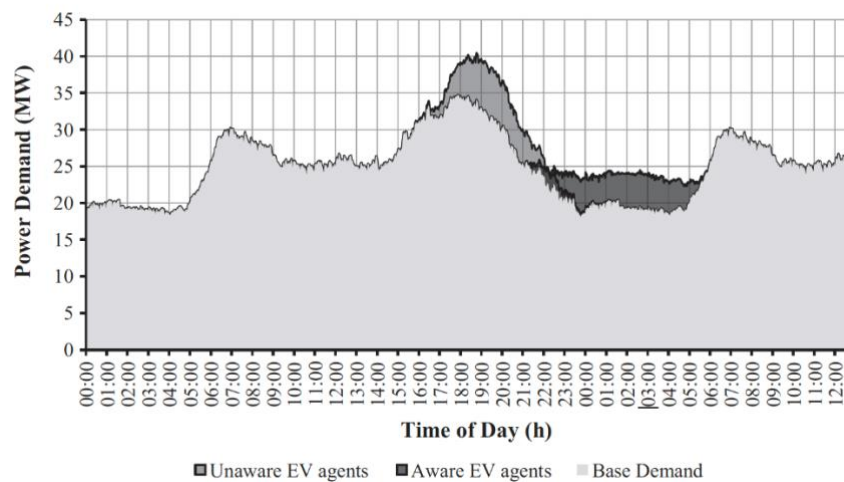
**Figura 6 – Histograma da frequência do tempo de início do carregamento [24]**

Os motivos pelos quais um utilizador de um VE decide ir carregar o seu veículo, podem ser vários: o estado da bateria, o preço da energia e, a oportunidade. A interação do utilizador com a bateria do seu veículo é bastante importante para compreender o seu comportamento não hora de se ligar à rede.

Franke and Krems [25] analisaram o comportamento de carregamento dos utilizadores num estudo realizado na Alemanha. Eles concluíram que os níveis de autonomia afetam as decisões de carregamento. Também desenvolveram um modelo conceitual baseado em princípios de autorregulação e teoria de controlo onde é possível entender, um pouco melhor, o uso eficiente de recursos energéticos. Este modelo, baseia-se na premissa de que sempre que os utilizadores interagirem com fontes de energia limitadas, estes, monitorizam e gerem, continuamente, a relação entre as suas necessidades de mobilidade e os seus recursos de

mobilidade. Por exemplo, as necessidades de mobilidade dizem respeito à distância que separa um local de um destino e os recursos de mobilidade dizem respeito à autonomia restante. Os utilizadores, geralmente, sentem a denominada *range anxiety* ou “stress de autonomia” que pode ser descrita como a discrepância experienciada entre os *buffers* de recurso de alcance disponíveis e preferenciais. Quanto maior a ansiedade, maior é a probabilidade de os utilizadores recorrerem a estratégias que possam lidar com esta situação, nomeadamente, conduzir de forma económica ou carregar o carro mais vezes.

Marmaras *et al.* [26] também consideraram dois perfis de comportamento para simulações: *unaware* e *aware*. O *Unaware* tenta encontrar a melhor solução possível com acesso limitado às informações e com o mínimo de interação com o ambiente e outros utilizadores de VEs. Aqui, o nível de *range anxiety* é forte e este utilizador procura sempre carregar o veículo, mesmo quando não é necessário. O *Aware* tem mais acesso a informação e interage com o seu ambiente e outros VEs de forma a encontrar a melhor solução possível. Este, tem um nível de *range anxiety* baixo, carregando o seu veículo só quando necessário. Segundo os resultados desta investigação, o utilizador *Unaware* começa a carregar assim que chega a casa, entre as 17:30h e as 18:00h, enquanto que, o utilizador *Aware* espera pelas horas fora de ponta, entre as 22:00h e as 06:00h (Figura 7).



**Figura 7 – Impacto do carregamento em casa (agregado) [26]**

Neubauer e Wood [27] aplicaram uma ferramenta de análise e simulação de vida útil da bateria para veículos (BLAST-V), do Laboratório Nacional de Energia Renovável, para

estudar a sensibilidade dos VEs em relação à *range anxiety* em diferentes cenários de diferentes infraestruturas de carregamento. Os resultados mostraram que os efeitos da *range anxiety* podem ser significantes, mas reduzidos com o acesso a infraestruturas de carregamento adicionais.

Nicholas *et al.* (2013) [28] estudaram o comportamento de carregamento ao simular viagens e carregamentos em estações públicas. Os resultados mostram que mais de 5% das viagens exigiriam recarregar num carregador público para diferentes autonomias e suposições de carregamento.

Xu *et al.* [15] usaram um modelo *logit* misto para estudar quais os fatores que influenciam os utilizadores de BEV na tomada de decisão do tipo de carregamento (normal ou rápido) e local. Os resultados sugerem que a capacidade da bateria, o estado inicial da bateria e número de carregamento rápidos realizados são os fatores preditivos para a escolha de um tipo e local de carregamento dos utilizadores. Ainda, o intervalo de dia entre o carregamento atual e a próxima viagem afeta positivamente o carregamento normal em casa / empresa.

## **2.7. FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO**

O SUMO (Simulation of Urban MObility) [29] é talvez o simulador de tráfego mais conhecido. É uma plataforma de simulação de fluxo de tráfego inter e multimodal, que inclui veículos, transporte público e peões. O SUMO tem várias ferramentas que permitem realizar tarefas como a localização de rotas, visualização, importação de redes e cálculo de emissões. Pode ser aprimorado com modelos personalizados e fornece várias Interfaces de Programação de Aplicações (IPA) para controlar remotamente a simulação.

MatSim [30] é uma *framework* para simulações de grande escala, baseada em agentes. Cada agente tem uma procura de transporte representada por uma cadeia de atividades que deve realizar durante um dia em diferentes horários e locais. As decisões de como viajar entre lugares são planeadas antes da simulação.

Outros simuladores como [31], que apresenta um método para a síntese e animação de fluxos de tráfego realistas em redes rodoviárias de grande escala utiliza uma técnica baseada num modelo contínuo de fluxo de tráfego. Outros modelos multiagente são frequentemente utilizados para criar modelos de comportamento dos condutores nas estradas [32].

Quando se incorpora VEs na simulação devem-se considerar outros aspetos como o consumo de energia, a escolha de estações de carregamento disponíveis e a duração do evento de carregamento. O problema do caminho mais curto e de planeamento de viagem é estudado em [33], onde os autores desenharam um esquema de aproximação para calcular o caminho mais eficiente em termos de energia. Em [34] é possível realizar simulações de tráfego utilizando apenas veículos elétricos, em que os VEs são simulados em estradas com carregamento on-line. Um caso similar é o de [35], em que foi construído um modelo espacial e temporal para o carregamento de VEs em carregadores públicos nas estradas. Soares *et. al* [36] apresenta um simulador probabilístico que gera um número de perfis de condução e carregamento de VEs que pode ser personalizado para se adaptar a diferentes redes de distribuição. Ele simula a forma como os veículos se movimentam de forma a se poder estimar os impactos que o carregamento possa ter em cada um dos barramentos do sistema, a energia consumida ou emissões.

Existem ainda outras ferramentas de simulação relacionada com VEs. FASTSim [37] é uma delas e permite comparar conjuntos de transmissão e estimar o impacto das melhorias tecnológicas na eficiência, desempenho, custo e duração da bateria nos veículos. V2G-Sim [38] utiliza modelos de condução e carregamento individuais de VEs para gerar previsões de impacto/oportunidade a nível espacial e temporal na rede elétrica. Alegre *et al.* [39] propões um modelo de VEs puros e híbridos, utilizando um ambiente Matlab/Simulink, focando-se em diferentes aspetos do veículo, como a potência do motor, a bateria, e observando como a distância percorrida e desempenho podem ser afetados pelas mudanças nas características do veículo.

É possível verificar o resumo com as características das ferramentas revistas na Tabela 1. O modelo proposto destaca-se em alguns aspetos que se podem observar.

**Tabela 1 - Resumo das ferramentas estudadas**

| <b>Modelo/Simulador</b> | <b>Decisões de carregamento utilizando comportamentos de carregamento estudados</b> | <b>Preços Dinâmicos</b> | <b>Simulação/Análise de Viagens</b> | <b>Modelo/Análise de Estações de Carregamento</b> | <b>Impacto na rede elétrica</b> |
|-------------------------|---|-------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------|
| <b>Modelo Proposto</b>  | <b>Sim</b>  | <b>Sim</b>              | Sim                                 | Considera   | Não                             |
| [31]                    | Não   | Não                     | Sim                                 | Não   | Não                             |
| MATSim [30]             | Não   | Não                     | Não                                 | Não   | Não                             |
| SUMO [29]               | Não   | Não                     | Sim                                 | Não   | Não                             |
| [33]                    | Não   | Não                     | Sim                                 | Sim   | Não                             |
| [34]                    | Não   | Não                     | Não                                 | Não   | Sim                             |
| [35]                    | Não   | Não                     | Não                                 | Sim   | Sim                             |
| EVeSSi [36]             | Não   | Não                     | Sim                                 | Não   | Sim                             |
| V2G-sim [38]            | Não   | Não                     | Não                                 | Não   | Sim                             |

## 2.8. PREÇO DA ENERGIA ELÉTRICA

Os preços da energia elétrica envolvem uma quantidade razoável de variáveis que os definem. Entre elas constata-se a produção de energia. A principal prática anti competitiva que pode impedir a concorrência no setor de energia elétrica, especialmente na produção, é o poder de mercado. O poder de mercado existe nos sistemas de energia reestruturados quando qualquer um dos produtores exerce influências nos preços de mercado ou na disponibilidade de energia elétrica [40].

A variação nos preços é também influenciada por outros fatores mais técnicos, como por exemplo a procura de energia. Da mesma forma como qualquer outro produto que tenha o objetivo final de obter lucro, quanto maior a procura, maior será o seu valor no mercado. No entanto, neste caso a procura tem consequências, não só sobre a necessidade de as centrais estarem disponíveis e serem capazes de preencher os picos de energia, que por vezes podem ser incertos, mas também sobre as linhas de transmissão.

O fluxo de energia na rede de transmissão invade algumas das restrições físicas dos sistemas de transmissão. Devido a isto, o sistema de transmissão fica congestionado. O congestionamento pode ocorrer devido a eventualidades inesperadas, como a falta de energia dos produtores, aumento inesperado da procura de energia ou falhas de equipamento. Os preços marginais locais (LMP<sup>5</sup>) são uma forma de os preços de energia elétrica no mercado grossista refletirem o valor da energia elétrica em diferentes locais, tendo em conta os padrões de carga, produção e os limites físicos do sistema de transmissão [41]. Este preço é calculado utilizando dados variados como, dados de cargas, perdas na transmissão, trânsito de potências e taxas de despacho.

Tipicamente, quando a eletricidade de custo mais baixo consegue alcançar todos os locais, os preços são semelhantes ou iguais em todo o mercado. Quando há congestionamento, a energia mais barata não consegue fluir livremente para alguns locais. Nesse caso, eletricidade com custo mais elevado é solicitada para atender a essa procura. Como resultado, os preços marginais de localização são mais altos nesses locais [42].

---

<sup>5</sup> Locational Marginal Pricing



Com a utilização de VEs prevê-se que as linhas possam ter problemas de congestionamento, principalmente com o aparecimento de carregadores rápidos, que possuem potências elevadas. Neste sentido os LMPs ganham um novo peso que deve ser estudo mais aprofundadamente.

## **2.9. SUMÁRIO**

Neste capítulo foram apresentados vários temas que demonstram ser relevantes na consolidação dos veículos elétricos como meio de transporte do futuro. Inicialmente, contextualizou-se o aparecimento dos VEs, tornando claro que a sua existência não é uma invenção da atualidade e quais são os motivos para não ser o meio de transporte mais utilizado.

De seguida foram abordados temas que, quando unificados complementam os conceitos envolventes dos VEs. As *Smart Grids*, *Demand Respond* e as *Smart Cities* são temas que se interligam e onde os VEs irão desempenhar uma componente fundamental na mobilidade do futuro.

## 3. SIMULADOR

Neste capítulo são descritos os parâmetros e algoritmo do simulador. O programa permite simular viagens de veículos elétricos de uma forma simples. O simulador foi desenvolvido de raiz, utilizando o RStudio [43], um software que desenvolve ferramentas gratuitas para R, uma linguagem de programação estatística *open-source*<sup>6</sup>.

### 3.1. PARÂMETROS

Na Tabela 2 estão descritos os parâmetros globais do simulador. Estes parâmetros significam que são aplicados a todos os perfis gerados, ou seja, que para qualquer momento da simulação são os mesmos. Estes são valores predefinidos, mas que podem ser alterados conforme as preferências.

---

<sup>6</sup> Código aberto: é um software com código-fonte que qualquer pessoa pode inspecionar, modificar e aprimorar.

**Tabela 2 – Parâmetros globais do simulador**

| Parâmetro   | Descrição                                 | Valor de exemplo |
|-------------|---|------------------|
| ncars       | Número de veículos elétricos              | 1000             |
| cdist       | Distância compensatória entre dois pontos | 20%              |
| sf          | Fator de escala do mapa                   | 5                |
| hcpower     | Potência do carregamento em casa          | 3.7 kW           |
| chargingeff | Eficiência do modo de carregamento        | 85%              |

### **3.1.1. PARÂMETROS DO CARRO**

A base deste simulador consiste em uma *data frame*<sup>7</sup> que contém todos os dados necessários para a manipulação dos veículos, como se pode verificar na Tabela 3. Nela estão informações sobre a localização inicial, todas as viagens programadas para o dia, o SoC da bateria e todas as outras variáveis necessárias para simular viagens e atualizar o estado da bateria. A maioria desses valores faz parte dos dados gerados. As localizações geradas são com base em coordenadas geográficas do mapa da *Smart City*.

---

<sup>7</sup> Estrutura de dados em R. Na *data frame* cada coluna representa uma variável e cada linha uma observação. Esta é a estrutura ideal para quando se tem várias variáveis de classes diferentes numa base de dados.

**Tabela 3 – Parâmetros do perfil de utilizador**

| Parâmetro  | Descrição   |
|------------|---|
| locationI  | Localização inicial do carro  |
| locationA  | Localização atual no período $j$  |
| socI       | Estado inicial da carga da bateria  |
| socA       | Estado atual da carga da bateria  |
| ae         | Consumo médio   |
| aeppkm     | Consumo médio percentual por quilómetro   |
| arp        | Alcance preferencial disponível   |
| times      | Tabela com os horários em que as viagens programadas serão realizadas                   |
| vm         | Velocidade média  |
| nd         | Número de destinos que cada carro tem   |
| dest1      | Tabela com as coordenadas dos locais das viagens a serem realizadas                     |
| i          | Variável booleana que determina se o carro terá mais de um destino                      |
| w1, w2, w3 | Pesos utilizados no cálculo da pontuação para determinar o melhor local de carregamento |
| ti         | Tabela com a importância de cada viagem (sendo 1 o menos importante e 3 o mais)         |
| hc         | Variável booleana que determina se o carro tem um carregador doméstico ou não           |

Cspecs é a data frame que contém todos os dados para os carros. Oito modelos de carros diferentes são utilizados na simulação. Estes dados servem para posteriormente se calcular a energia consumida ou tempo de carregamento, uma vez que cada veículo tem características diferentes.

**Tabela 4 – Parâmetros do modelo do veículo elétrico**

| <b>Parâmetro</b> | <b>Descrição</b>                | <b>Exemplo de valor</b> |
|------------------|---------------------------------|-------------------------|
| carmodel         | Nome do modelo do carro         | Nissan Leaf             |
| battery          | Capacidade da bateria do carro  | 40 kW                   |
| spower           | Potência de carregamento normal | 6.6 kW                  |
| fpower           | Potência de carregamento rápido | 50 kW                   |
| crange           | Autonomia média da bateria      | 240                     |
| Average economy  | Consumo médio                   | 0.1553 kWh/km           |
| scrate           | Taxa de carregamento normal     | 35                      |
| fcrate           | Taxa de carregamento rápido     | 290                     |

### **3.2. ALGORITMO DO SIMULADOR**

O simulador é constituído por duas partes principais: a geração de dados e a simulação das viagens dos carros. São gerados dados relativamente aos perfis de cada utilizador, como as características do veículo (bateria, consumo, etc.), as viagens a realizar (localizações e tempos de saída) e, os parâmetros comportamentais.

#### **3.2.1. GERAÇÃO DE DADOS**

A geração da população é um processo iterativo em que cada uma das variáveis é gerada aleatoriamente a partir de uma amostra de valores com probabilidades individuais. Inicialmente, é atribuída uma localização inicial a cada perfil, consoante as posições disponíveis no mapa da cidade. Esta localização será uma residência ou um ponto de saída/entrada na cidade, considerando utilizadores não habitantes da cidade. De seguida são gerados valores para o SoC inicial, o nível de carga preferido e o perfil de viagens. É também gerado o valor da capacidade da bateria que irá determinar o resto das características do veículo. Do mesmo modo é atribuído um valor para o peso da distância na decisão da escolha da estação de carregamento, que consoante esse valor, são depois atribuídos os restantes pesos. Os últimos conjuntos de dados a serem gerados são as viagens e tempos em que serão realizadas, assim como a sua importância. O algoritmo segue a seguinte estrutura:

```

FOR (each of the cars) DO
  Add na x coordinate to variable x
  IF (x equal to some of the correspondent
existent x available on the map)
    Add y coordinate to y variable
  END IF
  Generate initial SoC, available range
preference, battery capacity and trip importance
  Random generate w1
  IF (w1 equals to a specific value) THEN
    w2 = 1-w1-w3
    w3 = 1-w1-w2
  END IF
  IF (cars battery = value) THEN
    Attribute all data to this car model in
the cars data frame
  END IF
  IF (i=0 to 5) THEN
    Number of trips = 2, 3, 4 or 10-15
    Generate trips importance
    Generate locations for the number of
trips
    Generate work day times, night times
and/or leisure times
  END IF
END FOR

```

### 3.2.2. SIMULAÇÃO DE VIAGENS

A simulação das viagens corre em períodos de 15 minutos, totalizando 96 ( $j=96$ ) para um dia completo. Toda a sua estrutura e modo de funcionamento está descrita através de um fluxograma, na Figura 8. Cada veículo tem uma localização inicial e uma série de viagens a realizar durante o dia. Para cada viagem está associado um tempo de saída, o período  $j$  em que o utilizador irá realizar essa viagem. Quando isso acontece, é calculada a distância euclidiana – através de uma função incluída no software - entre a localização atual e a localização do próximo destino, com uma margem acrescida de 20%, uma vez que a distância calculada é em linha reta, multiplicado pelo fator de escala —  $sf$ . Sabendo a distância, determina-se o tempo de viagem consoante a velocidade média do veículo em questão. Por exemplo, se a distância calculada for de 9000 m, e a velocidade média for de 35 km/h, o tempo de viagem será de 15 minutos e 26 segundo, o que é superior a um intervalo de tempo, e desta forma a viagem demorará 2 períodos. No entanto se a velocidade média

for de 40 km/h, o tempo de viagem será de 13 minutos e 30 segundos, o que equivale a 1 período de tempo. O tempo de viagem determina-se através da seguinte equação:

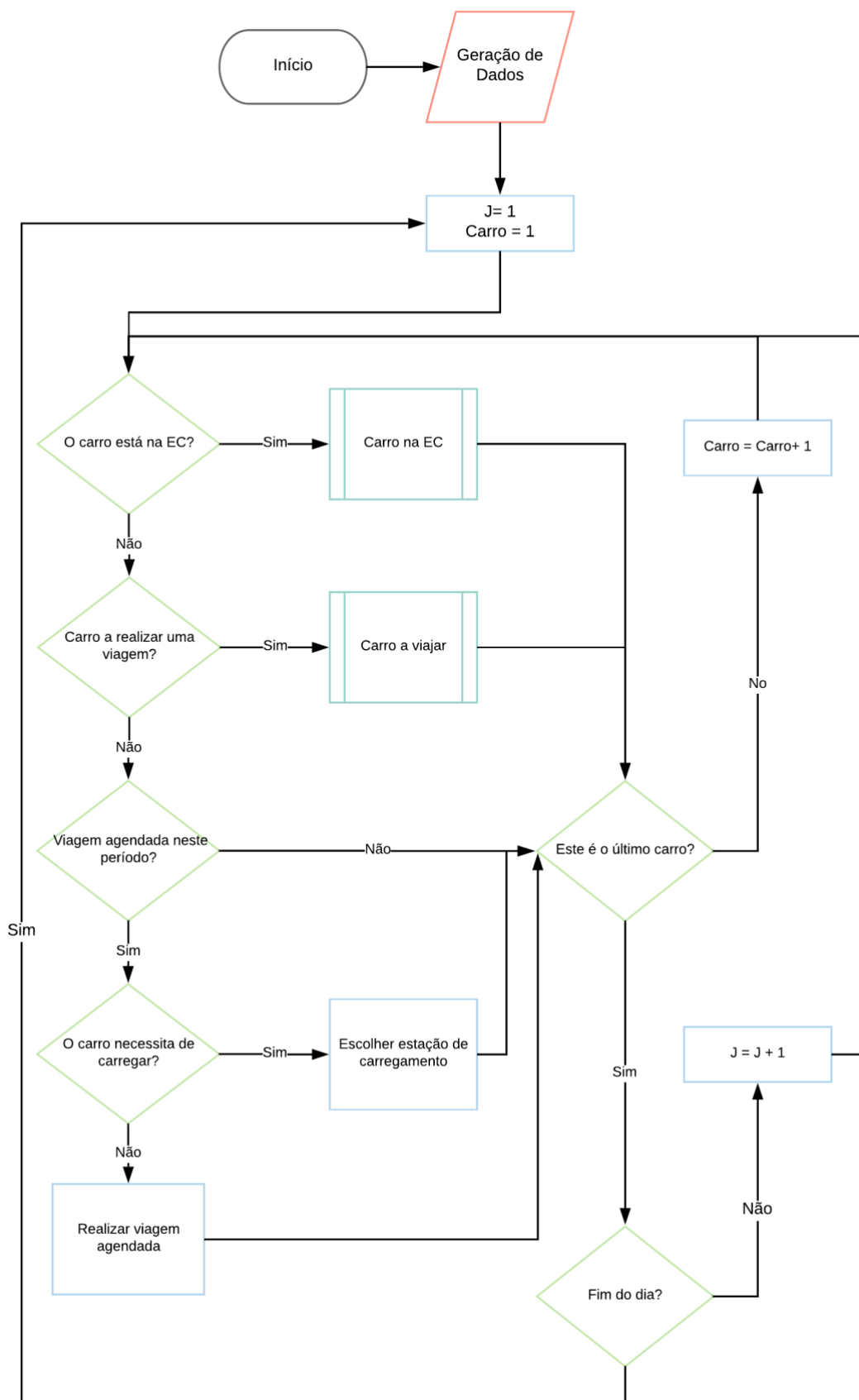
$$T = \frac{d}{V_m \times (1000/3600)} / 60 \quad (1)$$

onde:

$d$  — Distância entre destinos

$V_m$  — velocidade média do veículo

$$T_{sn} = \frac{T}{15} \quad (2)$$



**Figura 8 – Fluxograma do algoritmo da simulação das viagens**



### 3.2.3. ESTAÇÕES DE CARREGAMENTO

Para simular o carregamento, foram considerados quatro estações de carregamento e utilizadores que possuam um carregador privativo em casa. Das estações, duas são de carregamento normal com potência de 7,2 kW e, outras duas de carregamento rápido (*fast charge*) com uma potência de 50 kW. Os carregadores domésticos têm uma potência de 3,7 kW.

A localização das estações não foi escolhida utilizando uma metodologia. A sua distribuição foi realizada de modo a abranger todos os pontos da cidade, com alguma aleatoriedade. Neste sentido, o objetivo passa sempre por perceber quais e como os variados fatores podem influenciar a escolha do local de carregamento e, de que forma os preços da energia influenciam os utilizadores dos VEs.

### 3.2.4. DECISÕES DE CARREGAMENTO

Quando o utilizador decide ir carregar, tem de escolher um local (estação de carregamento ou casa). Para esta simulação foram consideradas 3 variáveis: distância, preço da energia e tempo de carregamento (*slow* ou *fast*). Depois de determinadas as pontuações de cada uma das variáveis (Equações 4, 5 e 6), somam-se, e considerando as preferências de cada utilizador por uma ou outra destas variáveis, obtém-se a pontuação final (Equação 3). A estação de carregamento com maior pontuação é o escolhido para o utilizador ir carregar o seu veículo.

$$Pontuação\ Final = Ds \times w_1 + Ps \times w_2 + Cts \times w_3 \quad (3)$$

$$Ds = 100 - \left( \frac{d - mindist}{maxdist - mindist} \times 100 \right) \quad (4)$$

onde:

$Ds$  — Pontuação da distância, de 0 a 100

$d$  — Distância entre os dois pontos, em metros

$mindist$  — menor distância entre as estações de carregamento

$maxdist$  — maior distância entre as estações de carregamento

$$P_s = 100 - \left( \frac{p - \text{minprice}}{\text{maxprice} - \text{minprice}} \times 100 \right) \quad (5)$$

onde:

$P_s$  — Pontuação do preço, de 0 a 100

$p$  — Preço da energia na estação de carregamento em questão, em €/kWh

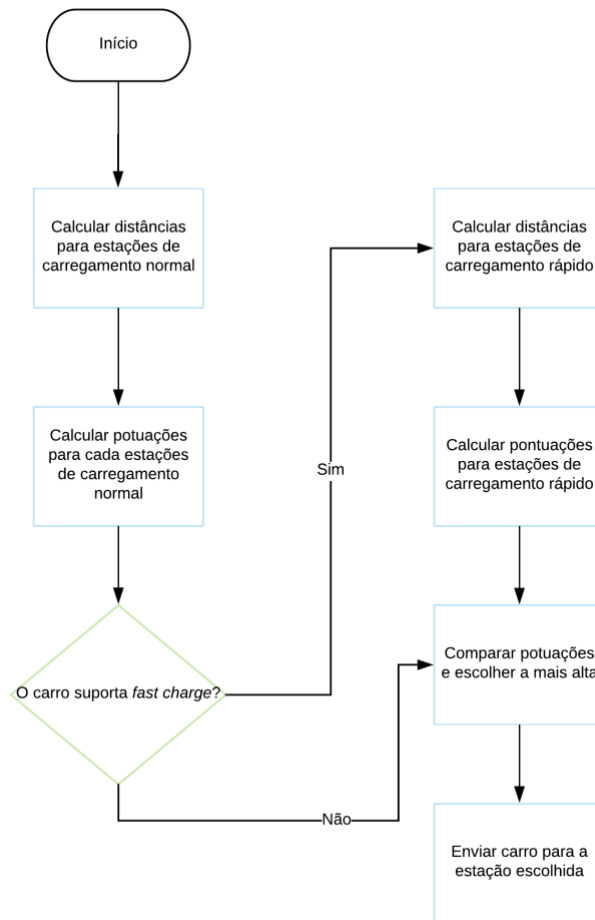
$$C_{ts} = 100 - \left( \frac{ct - \text{mintime}}{\text{maxtime} - \text{mintime}} \times 100 \right) \quad (6)$$

onde:

$C_{ts}$  — Pontuação do tempo de carregamento, de 0 a 100

$ct$  — Tempo de carregamento para a estação em questão, em intervalos de tempo

O processo de seleção do local preferido para carregar segue a estrutura descrita na Figura 9. Inicialmente são calculadas as distâncias às estações de carregamento do tipo normal. Estes valores, em conjunto com o preço da energia (€/kWh) e o tempo de carregamento para o tempo que tem o utilizador dispõe, permitem obter uma pontuação final entre 0 e 100 para cada estação. Se o veículo permitir carregamento rápido, este processo é repetido para as estações de carregamento deste tipo. Finalmente, comparam-se as pontuações para as estações disponíveis e aquela que for a maior será o local escolhido.



**Figura 9 – Fluxograma da escolha de estação de carregamento**

Para determinar o tempo que cada utilizador pode atrasar uma viagem para carregar o seu veículo, ou até mesmo se a pode ou não descartar, foi criada uma variável que define a sua importância. Assim, foram designados 3 níveis diferentes de valor:

1. Baixa importância – esta viagem é descartada e o carro fica a carregar até à viagem seguinte;
2. Média importância – o utilizador atrasa a viagem, e todas as outras posteriores, até a um limite de tempo que varia consoante o tipo de utilizador;
3. Alta importância – o utilizador tem de realizar esta viagem, não podendo carregar, a não ser que o nível de carga de bateria atinja um nível crítico.

Para assegurar que cada utilizador tem sempre carga suficiente para realizar as viagens foi considerado um estado crítico do nível da bateria. Seguindo os resultados previamente

revistos em [24], este valor é de 20%. Sempre que um utilizador atinja um nível inferior a este, independente da viagem que tenha que fazer deve ir carregar o seu veículo. Neste caso existem duas opções: ou encontra um local perto do seu local de trabalho (1º destino) e deixa lá o carro até à hora da próxima viagem, ou, caso contrário, procura o posto de carregamento mais perto de casa e deixa lá o carro durante a noite até à próxima viagem programada. Assume-se que o utilizador deixa o carro neste local e, hipoteticamente, faz o resto das suas viagens utilizando outro meio de transporte.

Alguns utilizadores possuem um carregador em casa de 3.7 kW. Estes utilizadores carregam os seus veículos todas as noites, o que permite ter uma carga completa, ou quase completa, quando efetuarem a sua primeira viagem do dia. Além disso, caso decidam ir carregar aquando da realização da última viagem (regresso a casa), a localização casa deverá ser considerada no cálculo da pontuação das estações de carregamento. No entanto, como normalmente os utilizadores que tem carregador na sua residência têm sempre a carga completa quando saem de casa, e considerando que podem carregar nas estações de carregamento, ao realizar a última viagem do dia, raramente sentem necessidade de carregar o seu veículo antes de regressar a casa.

Um dos motivos principais para que o utilizador decida carregar o seu veículo é o SoC. Como foi previamente referido no estado de arte, muitos utilizadores carregam a bateria consoante um nível de carga desejado, ou seja, aquele que o próprio entende como mínimo admissível para continuar a conduzir. Este nível de carga é variável, no entanto, ele é quase sempre mais que suficiente para as necessidades do utilizador. A geração deste valor de carga inicial é aleatória, dentro de um conjunto de valores com probabilidades de ser escolhidos.

### **3.2.5. PREÇO DA ENERGIA**

Uma das variáveis que o utilizador considera para decidir o local onde irá carregar o seu veículo é o preço da energia elétrica. Este preço difere entre o tipo de estação (*slow* ou *fast*) e as tarifas domésticas. Além disto, existem ainda duas situações onde os preços também são distintos: simulação com preços fixos ou simulação com preços variáveis (preços dinâmicos).

Nos preços fixos, o utilizador paga sempre o mesmo independentemente da altura em que vai carregar o veículo. O preço da energia no carregamento rápido é superior ao normal, e a tarifa paga em casa foi definida para ser igual em todas as situações.

No caso dos preços dinâmicos, estes variam em intervalos de 15 minutos. Isto é conseguido utilizando um programa de operação e reconfiguração da rede de distribuição, que atualiza os LMPs consoante a procura de energia. Depois do simulador receber os LMPs, é calculado o preço de energia. Em primeiro lugar calcula-se um preço adicional, que varia de acordo com a potência contratada (Equação 7), seja ela para o carregamento normal ou para o carregamento rápido:

$$PA = \frac{0,397 \times \text{Potência de Carregamento}}{720} / TxU \quad (7)$$

onde:

0,397 — Custo do operador da estação de carregamento

*Potência de Carregamento* — 7,2 kW para *slow charge* e 50 kW para *fast charge*

*TxU* — Taxa de utilização da estação de carregamento

720 — Número de horas média anual de ocupação

De seguida, calcula-se o preço final da energia para o consumidor (Equação 8). Este valor é a soma do LMP recebido, com a tarifa a aplicar para o período horário em questão e o preço adicional calculado anteriormente. A isto acrescenta-se uma taxa de 5%, a pagar ao proprietário da estação de carregamento, e o valor do IVA:

$$\text{Preço Final} = (LMP + Tarifa + PA) * 1,05 * IVA \quad (8)$$

onde:

*LMP* — *Locational Marginal Prices* recebidos a cada período pelo programa auxiliar

*Tarifa* — Tarifa da energia elétrica por período horário

## 4. ESTUDO DE CASOS

Para realizar os casos de estudo foi utilizado um modelo físico da *smart city*, GECAD-BISITE [44] como local. A cidade é composta por 6 edifícios de escritórios, um hospital, um quartel de bombeiros, um centro comercial e 15 edifícios habitacionais, como se pode verificar nas Figura 10. A rede que alimenta toda a cidade é constituída por 13 barramentos, 4 dos quais alimentam as estações de carregamento existentes. As estações de carregamento normal (1 e 2), encontram-se junto ao edifício L19 e junto das residências, respetivamente. As estações de carregamento rápido estão situadas no edifício L24 e no L1 (centro comercial), respetivamente (Figura 11). A escala visível nesta figura é apenas utilizada como referência, uma vez que o fator de escala ( $sf$ ) permite aumentar o tamanho da cidade, situação que se verifica nos casos de estudo deste capítulo, onde se utilizou um  $sf=5$ .

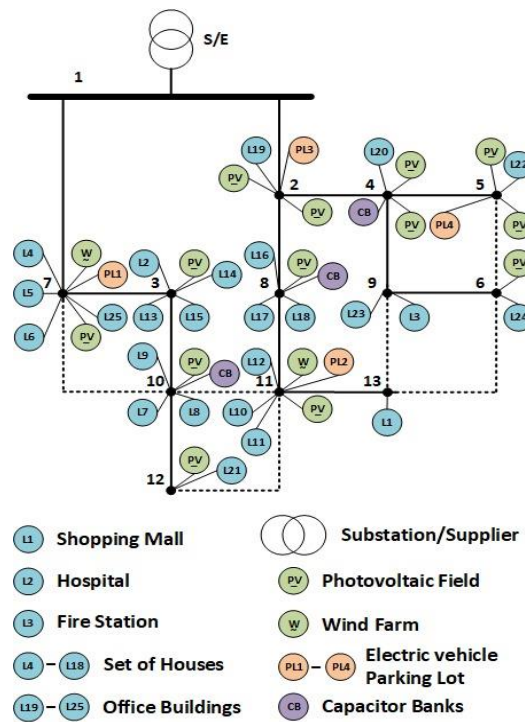


Figura 10 – Topologia da rede da cidade

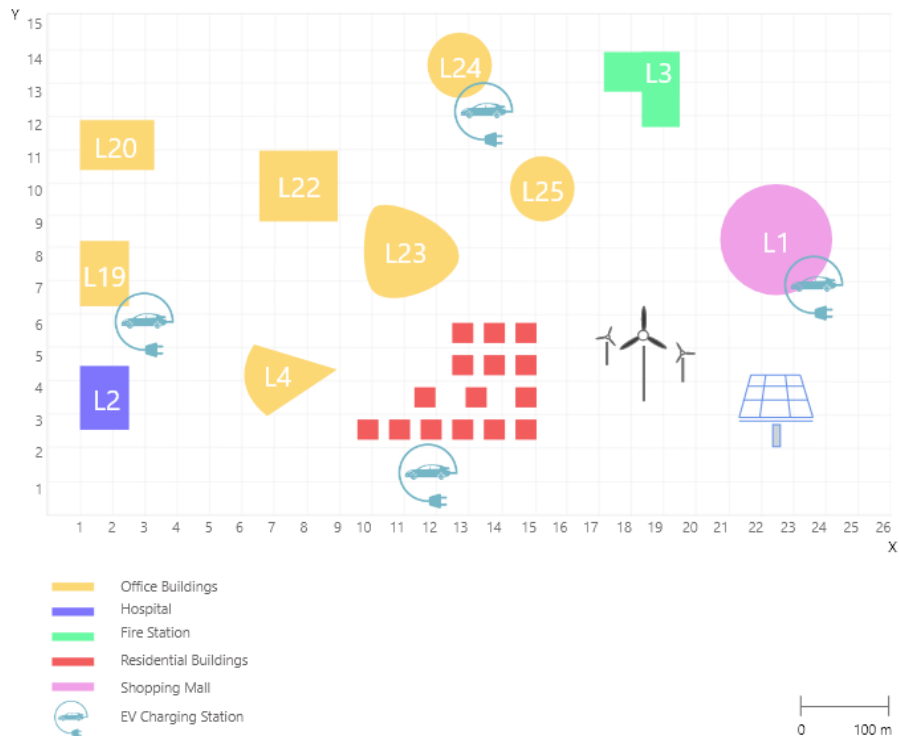


Figura 11 – Topologia da cidade

Foram realizadas simulações utilizando preços de energia fixos e variáveis. Para cada uma foram variadas as preferências do utilizador pelo preço, distância e tempo de carregamento.

Para que a comparação entre as simulações seja mais credível, as populações utilizadas são sempre as mesmas, alterando apenas os aspetos que diferenciem os casos de estudo. Valores como número e modelos dos veículos (Tabela 5), carga inicial da bateria, conjunto de viagens a realizar, tempos a que estas serão efetuadas e localização inicial são exatamente os mesmos em todas as simulações realizadas nos casos de estudo deste capítulo. Os casos de estudo que obtiveram maior preponderância têm uma população de 5000 VEs. No entanto, também foram realizadas simulações adicionais com populações de 2500 e 7000 VEs para melhor compreender a relevância do número de veículos.

**Tabela 5 – Modelos de VEs utilizados nos casos de estudo**

| <b>Modelo</b>     | <b>Bateria (kWh)</b> | <b>Potência de carregamento normal (kW)</b> | <b>Potência de carregamento rápido (kW)</b> | <b>Consumo (kWh/km)</b> |
|-------------------|----------------------|---|---|-------------------------|
| Nissan Leaf       | 40,0                 | 6,6   | 50  | 0,1553                  |
| Tesla Model S 70D | 75,0                 | 7,4   | 50  | 0,2100                  |
| BMW i3            | 33,2                 | 7,4   | 50  | 0,1584                  |
| Renault Zoe       | 41,0                 | 7,4   | -   | 0,1460                  |
| Renault Kangoo    | 33,0                 | 7,4   | -   | 0,1926                  |
| VW e-Golf         | 24,2                 | 7,2   | 40  | 0,1584                  |
| Ford Focus        | 33,5                 | 6,6   | 50  | 0,1926                  |
| Hyundai IONIQ     | 30,5                 | 6,6   | 50  | 0,1429                  |



#### 4.1. PREÇOS FIXOS

Neste estudo de caso foram utilizados preços fixos para qualquer período do dia. As estações de carregamento normal praticam o mesmo preço entre elas, e o mesmo acontece para as estações de carregamento rápido as quais têm um preço superior. O preço da energia doméstica é constante para todas as simulações. Para cada um dos casos de estudo utilizando preços fixos foram realizadas simulações com três cenários de preços, como se pode verificar na Tabela 6.

**Tabela 6 – Preços fixos da energia**

| Local                     | Preço (€/kWh) |           |           |
|---------------------------|---------------|-----------|-----------|
|                           | Cenário 1     | Cenário 2 | Cenário 3 |
| Estação de Carregamento 1 | 0,15          | 0,2       | 0,25      |
| Estação de Carregamento 2 | 0,15          | 0,2       | 0,25      |
| Estação de Carregamento 3 | 0,25          | 0,3       | 0,35      |
| Estação de Carregamento 4 | 0,25          | 0,3       | 0,35      |
| Casas                     | 0,2094        | 0,2094    | 0,2094    |

##### 4.1.1. ESTUDO DE CASO 1 - PREFERÊNCIA PELO PREÇO

Neste caso foram gerados valores superiores para a variável do peso do preço, em relação às restantes variáveis (Tabela 7). Isto é conseguido atribuindo probabilidades para cada uma das situações.

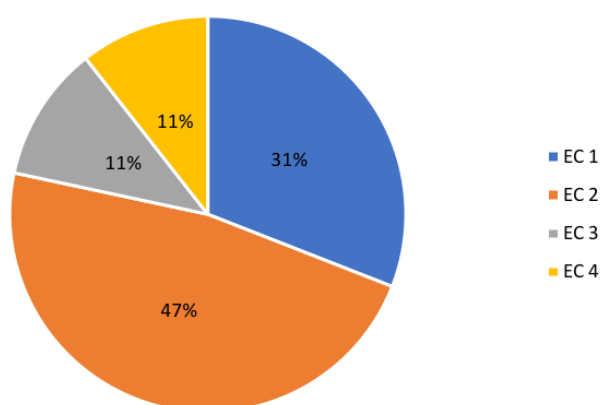
**Tabela 7 – Pesos para Caso de Estudo 1**

| Preferência | Valor (%) |    |    | Probabilidade (%) |
|-------------|-----------|----|----|-------------------|
|             | w1        | w2 | w3 |                   |
| Preço       | 15        | 80 | 5  | 65                |
| Distância   | 50        | 40 | 10 | 30                |
| Tempo       | 40        | 40 | 20 | 5                 |

A geração destes valores tem o objetivo de que esta população dê prioridade ao preço em detrimento da distância e do tempo de carregamento, aquando da escolha da estação de

carregamento. Neste caso, cerca de 65% da população atribui uma importância de 80% da variável de preço para escolher o local onde irão deixar o seu veículo a carregar.

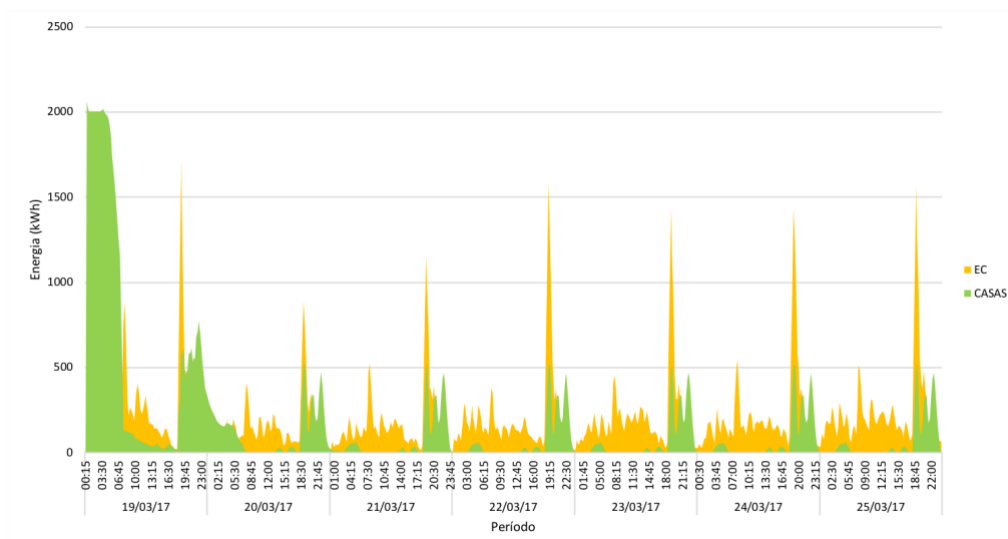
Na Figura 12 é possível verificar que a estação de carregamento 2 foi a preferida pelos utilizadores, com 47% dos veículos carregados. A estação 1 foi a segunda mais escolhida, enquanto que as de carregamento rápido foram as menos utilizadas, com um total de 22%. As estações de carregamento normal são as que têm o preço de energia mais baixo, em comparação com as de carregamento rápido. Isto, considerando as preferências desta população, justifica a escolha destas estações.



**Figura 12 – Aderência dos utilizadores às estações de carregamento - Preço**

Uma vez que, neste caso, o único ponto de diferenciação entre as estações de carregamento normal é a distância, pode-se concluir que a estação 2 será a que mais próximo se encontra dos destinos dos utilizadores em comparação com as restantes.

Na Figura 13, é visível que nos períodos de maior procura de energia, entre as 18:00h e as 22:00h. Relativamente à energia carregada, existe no primeiro dia um pico elevado nas casas. Isto está relacionado com a geração de dados. Inicialmente o nível das baterias varia entre os 45% e 65%, e os utilizadores que possuem um carregador doméstico, carregam sempre o seu veículo. Após o primeiro dia as baterias encontram-se com níveis de carga mais elevados.



**Figura 13 – Energia carregada por período nas ECs e nas casas (C.1)**

#### 4.1.2. ESTUDO DE CASO 2 – PREFERÊNCIA PELA DISTÂNCIA

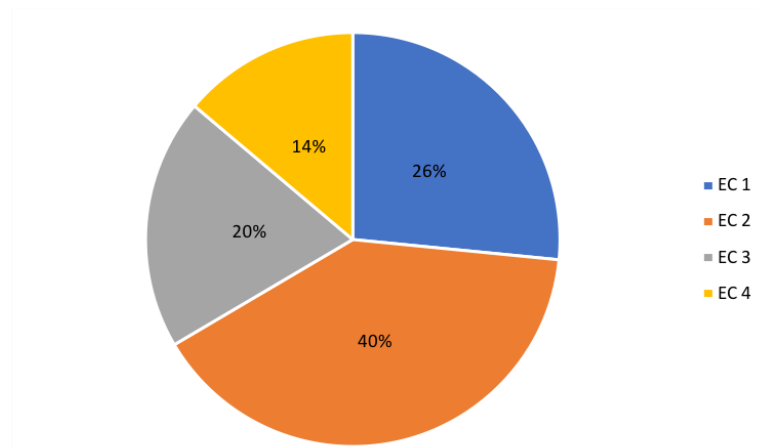
Nesta simulação, a preferência cai sobre a proximidade das estações de carregamento em relação ao percurso total que o utilizador terá de realizar, isto é, o valor mais baixo da soma da distância entre a localização atual e a EC e a distância entre a EC e o destino seguinte, será a que terá maior pontuação. Na Tabela 8, estão descritos os valores dos pesos esperados nos utilizadores desta população.

**Tabela 8 – Pesos para o Caso de Estudo 2**

| Preferência      | Valor (%) |          |           | Probabilidade (%) |
|------------------|-----------|----------|-----------|-------------------|
|                  | w1        | w2       | w3        |                   |
| Preço            | 50        | 20       | 30        | 30                |
| <b>Distância</b> | <b>70</b> | <b>5</b> | <b>25</b> | <b>65</b>         |
| Tempo            | 20        | 40       | 40        | 5                 |

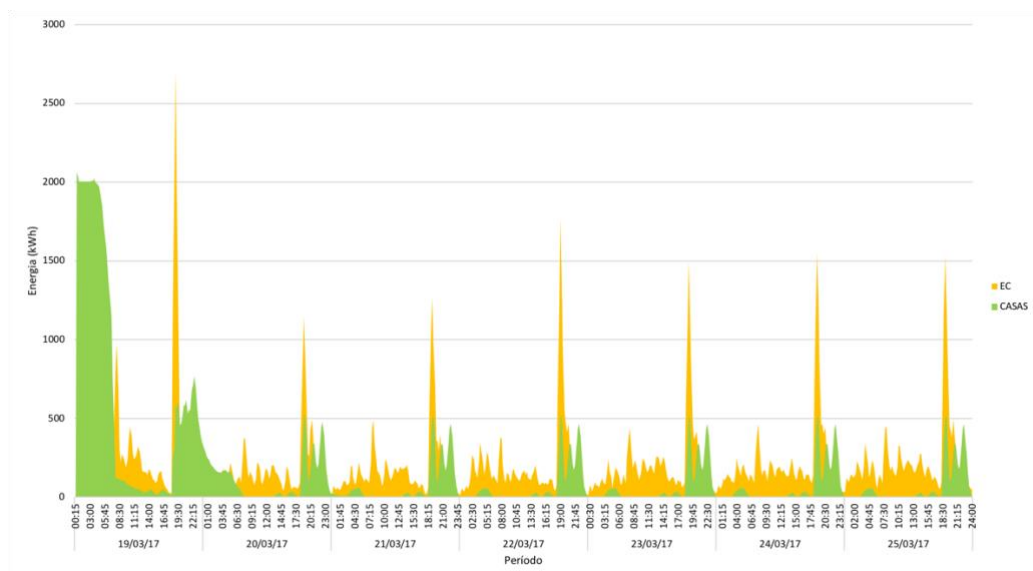
Neste caso, as EC rápido obtiveram uma maior aderência em comparação com a simulação anterior, o que nos pode indicar que, quando o preço não é o fator mais importante, estas estações atraem mais utilizadores que se encontram mais próximos. Ainda assim, estas estações não têm uma localização ótima, uma vez que mesmo com os utilizadores a

preferirem locais para carregar mais próximos, optaram em maioria pelas EC normais (Figura 14).



**Figura 14 - Aderência dos utilizadores às estações de carregamento (Distância)**

Comparativamente ao caso de estudo anterior, na Figura 15, observa-se que a energia carregada nas EC no primeiro dia foi superior. Esta superioridade também se verifica em relação à energia carregada nas casas.



**Figura 15 - Energia carregada por período nas ECs e nas casas (C.2)**

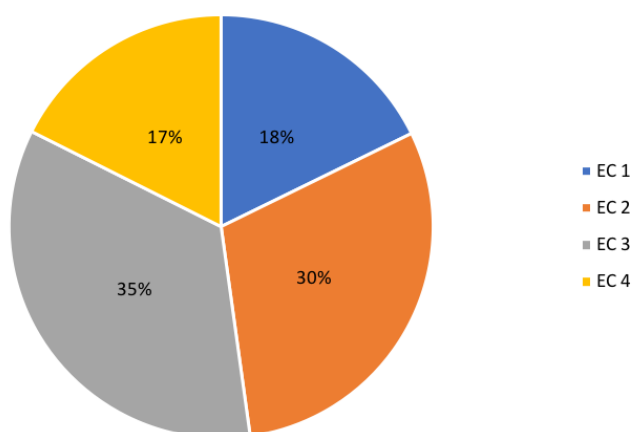
#### 4.1.3. ESTUDO DE CASO 3 – PREFERÊNCIA PELO TEMPO DE CARREGAMENTO

A população com maior preferência pelo tempo de carregamento, vai obviamente dar maior prioridade às EC rápido. São estas que obtêm os melhores resultados na pontuação, uma vez que conseguem os menores tempos a carregar a carga pretendida pelo utilizador. Os valores das variáveis de peso geradas estão descritos na Tabela 9.

**Tabela 9 – Pesos para o Caso de Estudo 3**

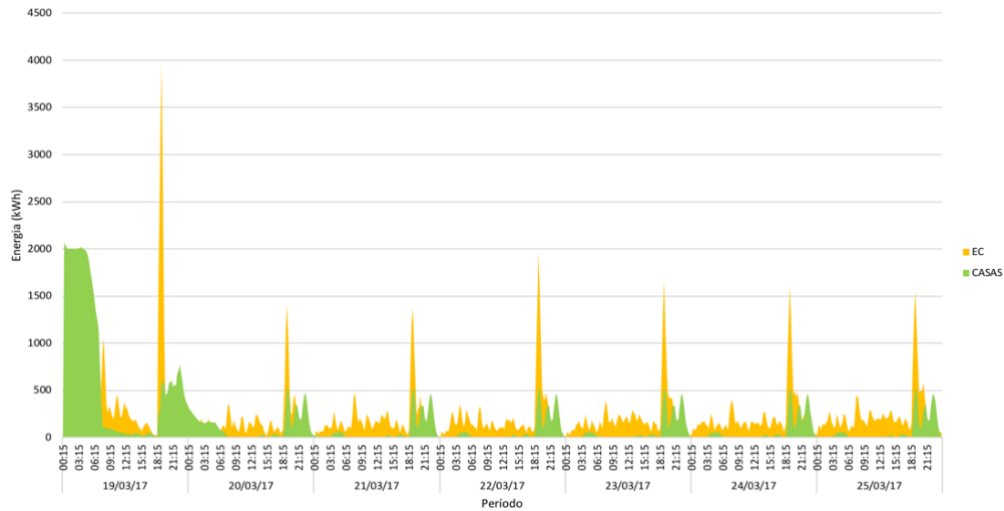
| Preferência  | Valor (%) |          |           | Probabilidade (%) |
|--------------|-----------|----------|-----------|-------------------|
|              | w1        | w2       | w3        |                   |
| Preço        | 40        | 40       | 20        | 5                 |
| Distância    | 30        | 20       | 50        | 30                |
| <b>Tempo</b> | <b>15</b> | <b>5</b> | <b>80</b> | <b>65</b>         |

Com este tipo de preferência, as EC rápido tiveram maior aderência, apesar dos seus preços mais elevados (Figura 16). Na totalidade, tiveram 52% dos utilizadores a escolherem este tipo de estações para carregar o seu veículo. No entanto, esta superioridade é mínima, o que demonstra que os preços baixos e localizações mais próximas das EC normal têm uma forte influência na decisão dos utilizadores.



**Figura 16 - Aderência dos utilizadores às estações de carregamento (Tempo)**

Esta foi a simulação em que, inicialmente, existiu uma menor energia carregada nas casas dos utilizadores. A potência elevada deste tipo de carregamento justifica estes valores mais elevados na energia consumida (Figura 17).



**Figura 17 - Energia carregada por período nas ECs e nas casas (C.3)**

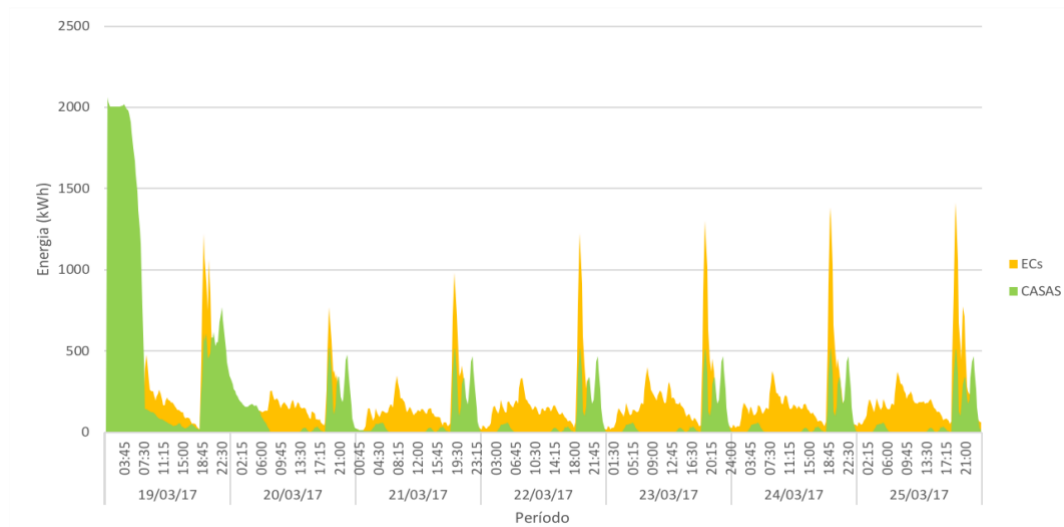
## 4.2. PREÇOS DINÂMICOS — LMPs

As simulações utilizando preços variáveis foram conseguidas com recurso a um programa específico. Na metodologia proposta, os LMPs são definidos através de multiplicadores Lagrangeanos das restrições correspondentes (equilíbrio de potência) do problema de otimização que tem como objetivo minimizar os gastos com o operador do sistema. O problema de operação e reconfiguração da rede de distribuição num contexto de *smart grids* com alta penetração de recursos de PD em relação aos aspetos de comportamento dos utilizadores de VEs e preço de carregamento de VE dinâmico considerando LMPs é classificado como problema com variáveis discretas e contínuas (MINLP) devido às características de não-linearidade. Para resolver problemas complexos como este, a decomposição de *Benders* é uma técnica adequada.

### 4.2.1. ESTUDO DE CASO 1 – PREFERÊNCIA PELO PREÇO

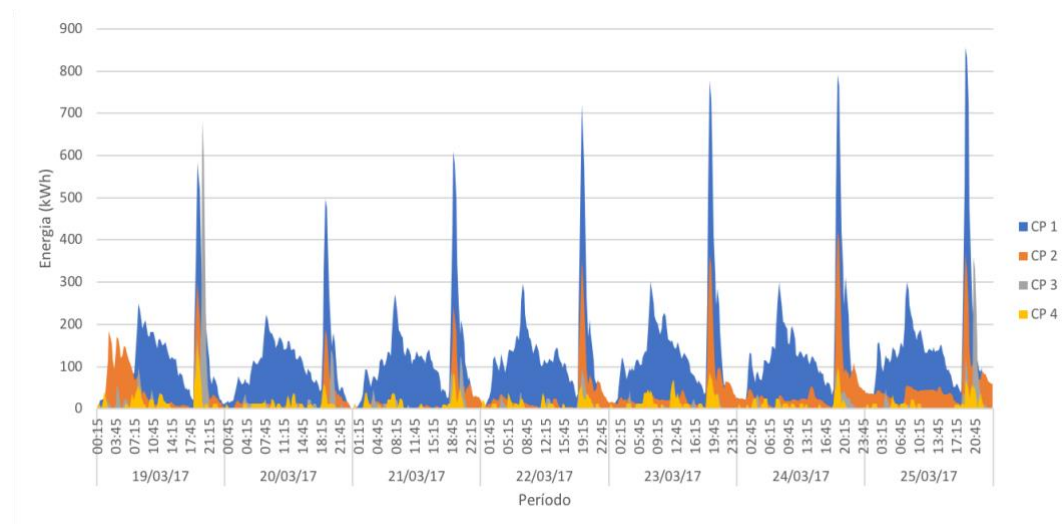
Os resultados das cargas são semelhantes aos resultados obtidos nas simulações com preços fixos. Isto acontece devido à população ser exatamente a mesma e à linearidade do algoritmo

do simulador. Espera-se, no entanto, maior variação relativamente aos encargos com a energia (Figura 18).



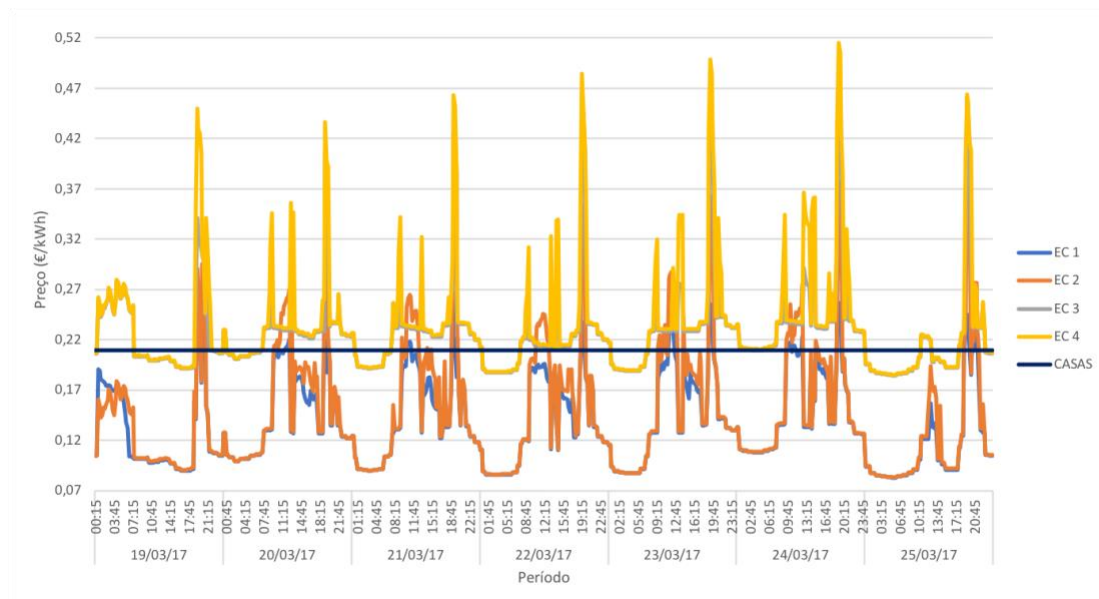
**Figura 18 – Energia carregada por período nas ECs e nas casas (C.2.1)**

Neste caso, como se observa na Figura 19, verifica-se uma enorme aderência às estações de carregamento normal, com principal enfoque na 1.



**Figura 19 - Energia carregada por período nas ECs (C.2.1)**

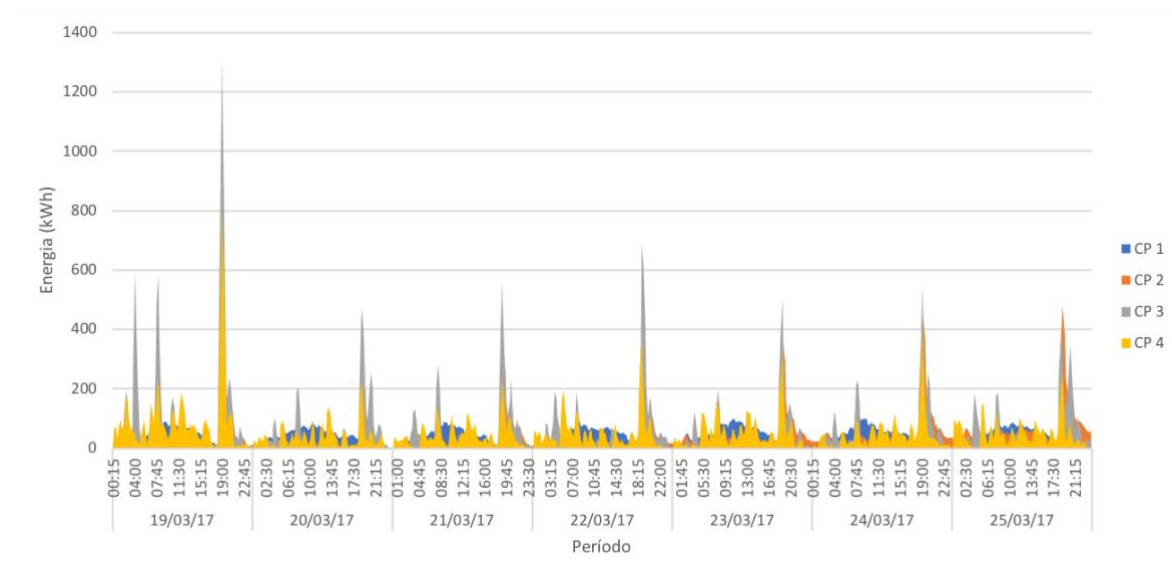
A variação dos preços da energia é visível na Figura 20. A variação entre os preços do mesmo tipo de estações é muito semelhante. No entanto é possível identificar que a estação com os preços mais baixos é a EC 1, o que justifica a enorme aderência a este local.



**Figura 20 – Preços da energia nas EC por período (C.2.1.)**

#### 4.2.2. ESTUDO DE CASO 2 – PREFERÊNCIA PELA DISTÂNCIA

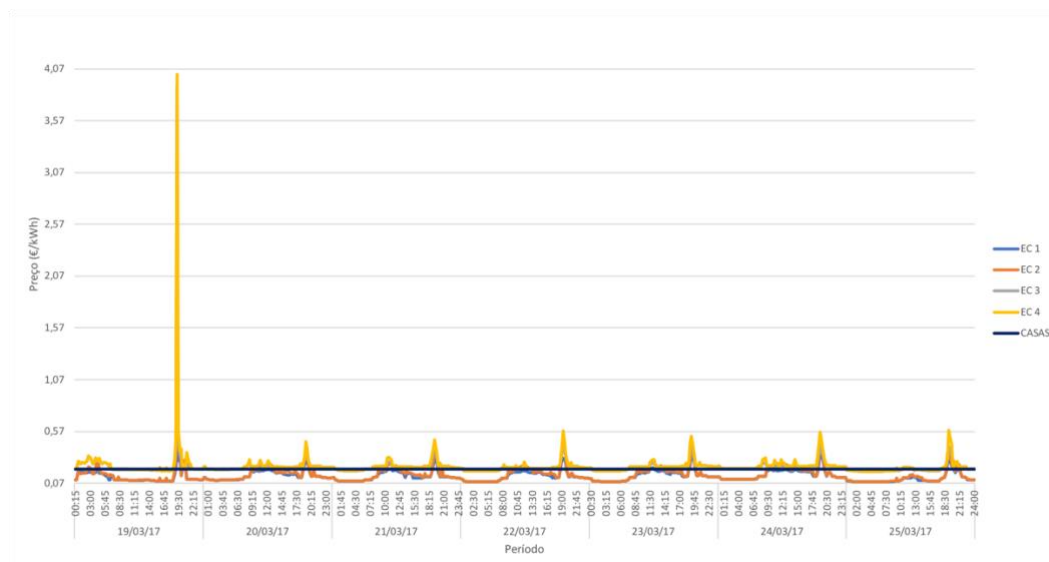
Com a utilização de preços dinâmicos, este caso com preferência pela distância, a energia carregada foi superior nas EC rápido, como se verifica na Figura 21.



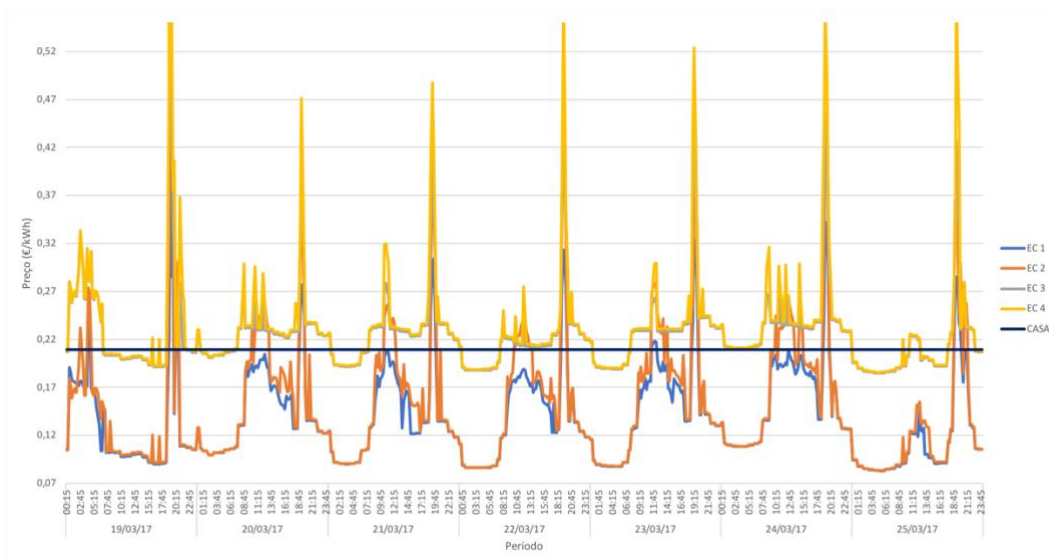
**Figura 21 – Energia carregada por período nas ECs (C.2.2)**



A variação dos preços foi semelhante ao verificado no caso anterior, no entanto existiu um pico elevado no preço. Às 19:15h do primeiro dia é possível observar que o preço da energia na estação 4 aumentou até aos 4,018 €/kWh, algo bastante fora do esperado. Se considerarmos um preço base de 0,20 €/kWh, este valor é 20 vezes superior. A grande quantidade de energia a circular no barramento correspondente à EC 4, pode justificar estes valores. Estas variações são verificadas nas Figuras 22 e 23.



**Figura 22 - Preços da energia nas EC por período (C.2.2)**



**Figura 23 - Preços da energia nas EC por período 2 (C.2.2)**

#### 4.2.3. ESTUDO DE CASO 3 – PREFERÊNCIA PELO TEMPO DE CARREGAMENTO

Na Figura 24, observa-se que a maioria da energia consumida é proveniente das EC rápido.

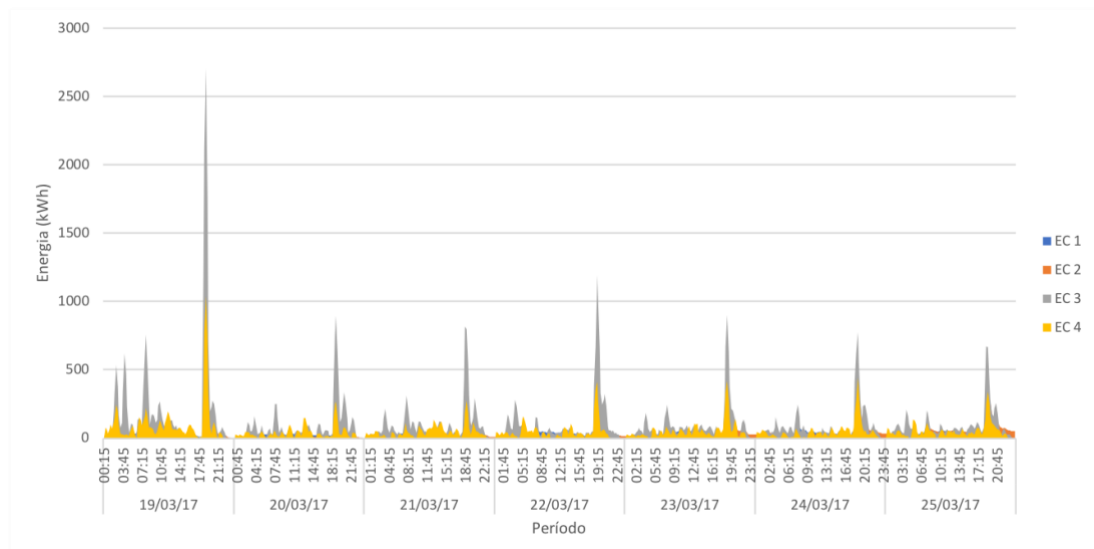


Figura 24 - Energia carregada por período nas ECs (C.2.3)

Nesta simulação, constata-se que os preços da energia são mais elevados do que nas simulações anteriores. Na Figura 25, observa-se uma maior diferença entre os preços das EC normal, em relação aos outros casos de estudo. Os preços das EC rápido são também mais elevados.

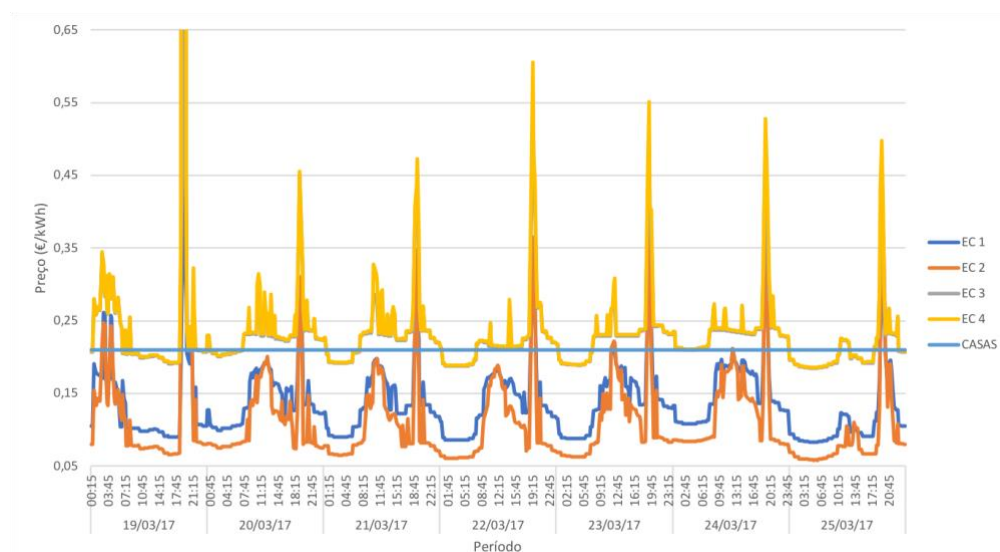


Figura 25 - Preços da energia nas EC por período (C.2.3)

Com a maioria dos utilizadores a preferirem uma estação de carregamento rápido, houve uma quantidade elevada de carga nos barramentos em que estas estações estão ligadas. Desta forma existiu um enorme congestionamento nas linhas o que levou ao aumento dos LMPs e, consequentemente, ao aumento dos preços finais de energia (Tabela 10).

**Tabela 10 – Preços da energia elevados nos períodos de pico**

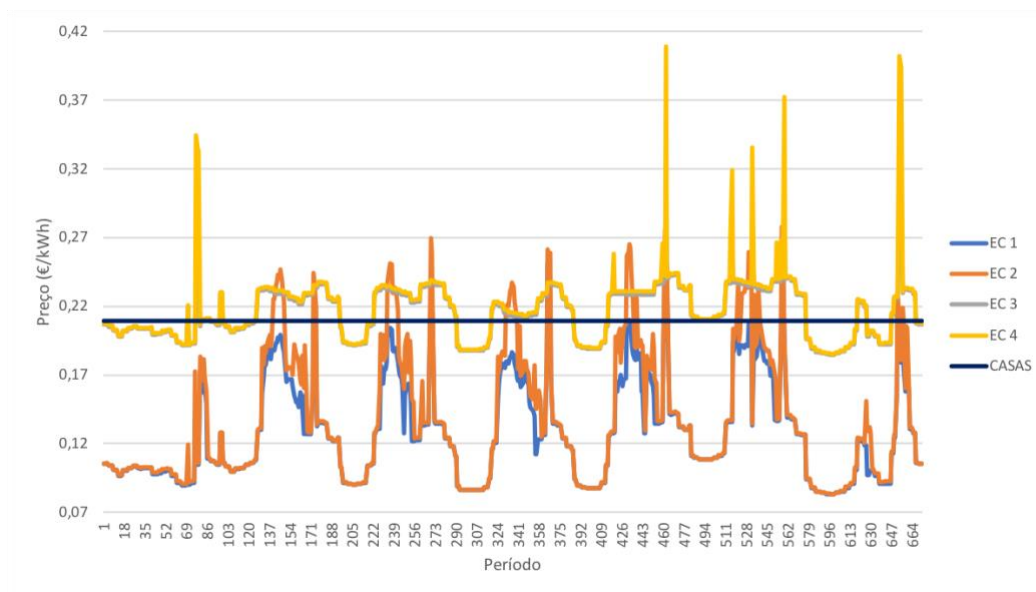
| Período (h)  | Preço (€/kWh)   |                 |                 |                 |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|              | EC 1            | EC 2            | EC 3            | EC 4            |
| <b>18:30</b> | 0,0914          | 0,0677          | 0,1926          | 0,1937          |
| <b>18:45</b> | 0,1927          | 0,29            | 0,3721          | 0,375           |
| <b>19:00</b> | 0,3688          | <b>3,6962</b>   | 0,4632          | <b>4,0335</b>   |
| <b>19:15</b> | <b>12915,04</b> | <b>12915,01</b> | <b>12915,14</b> | <b>12915,14</b> |
| <b>19:30</b> | 0,3468          | 0,6179          | <b>4,0183</b>   | <b>4,0526</b>   |
| <b>19:45</b> | 0,2817          | 0,3983          | 0,3999          | 0,4041          |

Neste caso é possível verificar, a vermelho, preços superiores a 1000 €/kWh às 19:15. Estes resultados não seriam realistas, uma vez que preços com estes valores seriam impraticáveis no mercado. Além disso, também existiram preços superiores a 1 €/kWh em alguns períodos, que já são bastante elevados.

#### **4.2.4. ESTUDO DE CASO 4 – POPULAÇÃO DE 2500 VES**

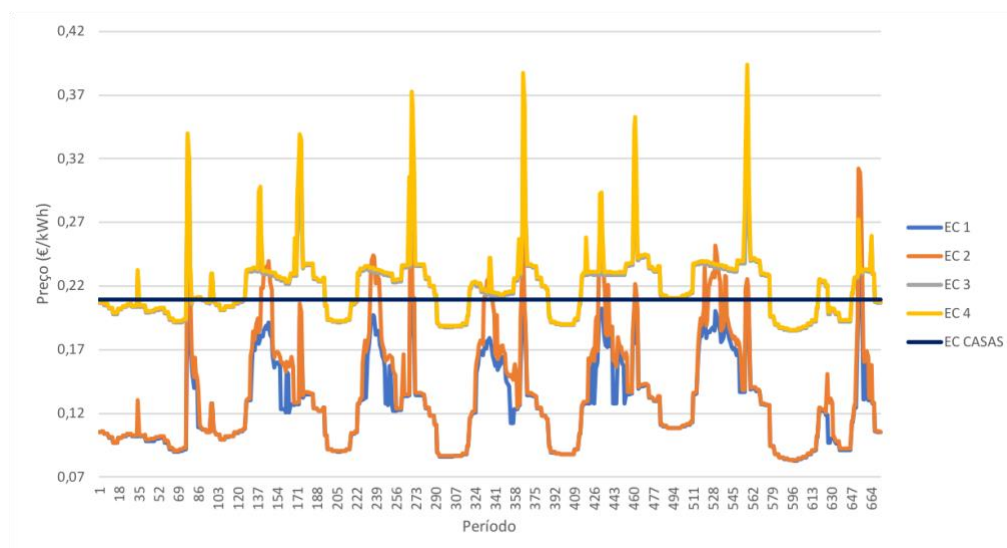
Para além dos casos de estudo anteriores, utilizando uma única população de 5000 VEs, variando alguns aspetos comportamentais, foram realizadas simulações com uma população de 2500 VEs. Os resultados obtidos foram muito semelhantes ao que foi verificada com a população anterior, com a diferença que aqui os preços da energia foram mais baixos.

Na Figura 26 observam-se os preços da energia em cada EC para a preferência pelo preço. O preço médio da energia nas EC normal é de 0,13 €/kWh e nas EC rápido 0,22 €/kWh. O preço mínimo verificado foi de 0,08 €/kWh e o máximo de 0,41 €/kWh.



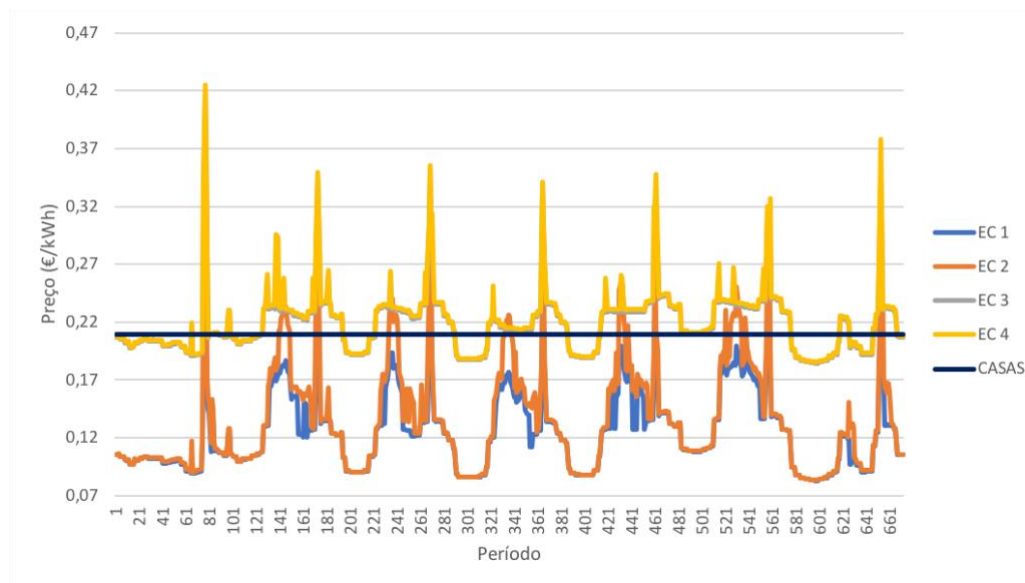
**Figura 26 – Preços da energia nas EC por período – Preço (C.2.4)**

Na preferência pela distância (Figura 27), os resultados são semelhantes. Os preços mínimos e máximos verificados foram de 0,08 €/kWh e de 0,39 €/kWh.



**Figura 27 - Preços da energia nas EC por período – Distância (C.2.4)**

Em relação à preferência dos utilizadores pelo tempo de carregamento, observaram-se resultados mais razoáveis em comparação com a população de 5000 VEs. Aqui o preço máximo constatado foi de 0,42 €/kWh, como se verifica na Figura 28.

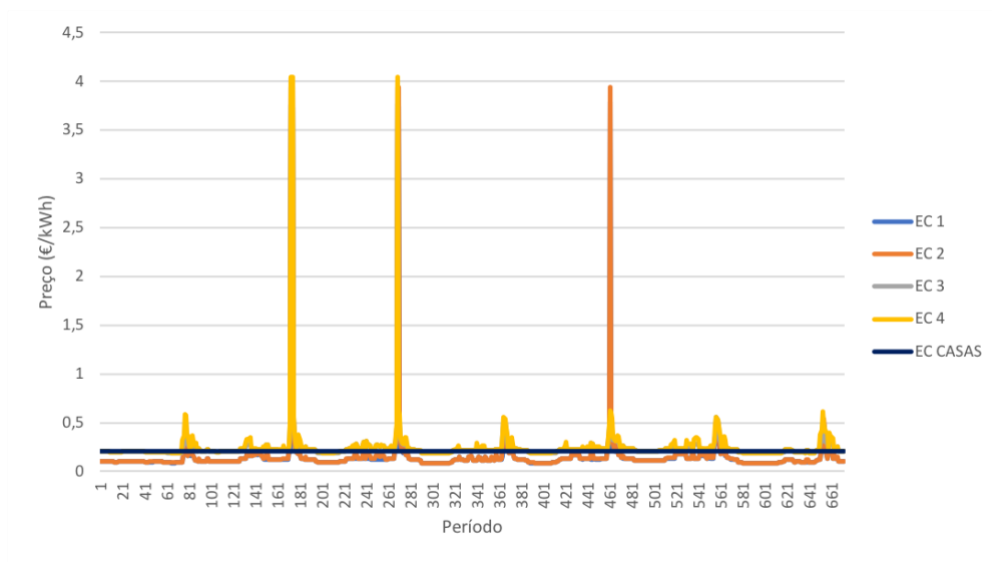


**Figura 28 - Preços da energia nas EC por período – Tempo (C.2.4)**

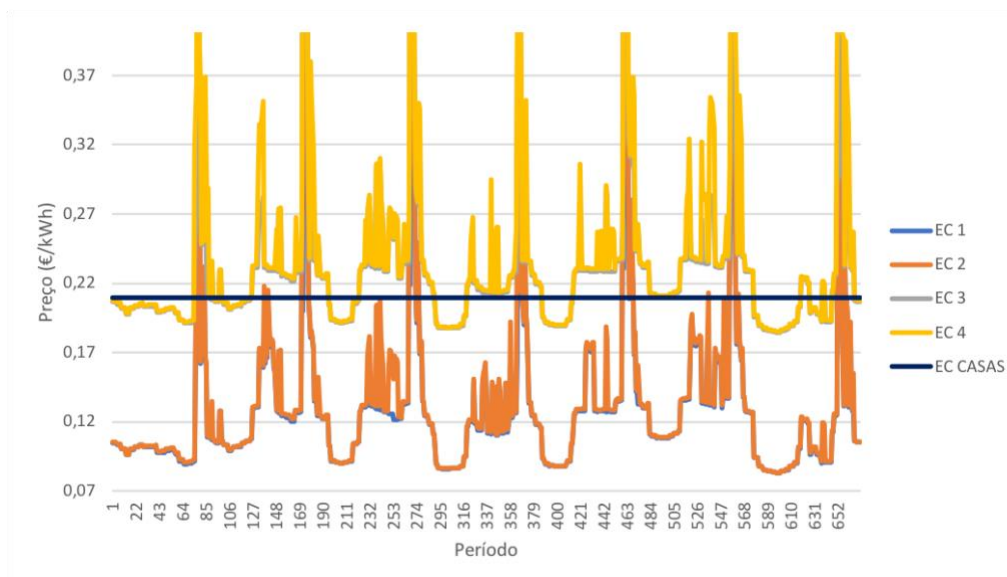
#### **4.2.5. ESTUDO DE CASO 5 – POPULAÇÃO DE 7000 VES**

Por último, foi realizada uma simulação, apenas para a preferência pelo preço, com uma população de 7000 VEs. Uma vez que os resultados entre esta preferência e a da distância têm-se verificado semelhantes, e assumindo que este aumento na população irá devolver valores ainda mais irrealista relativamente ao preço da energia, não se justificam as simulações.

Neste caso, à semelhança do que se observou com a população de 5000 VEs, existem preços acima de 1 €/kWh. Todas as estações obtiveram preços máximos entre os 3,5 e 4 €/kWh. Na Figura 29 é possível observar a discrepância de preços e na Figura 30 as diferenças entre cada uma das EC.



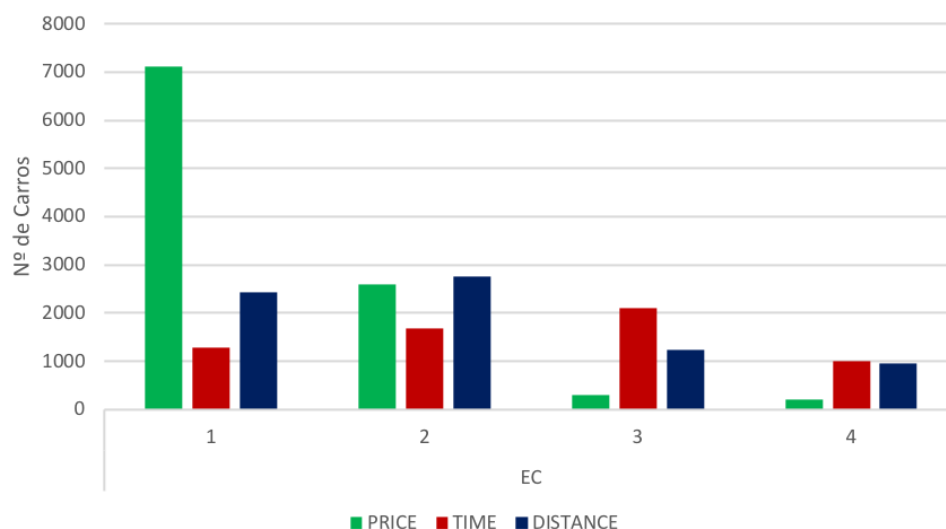
**Figura 29 – Preço da energia nas EC por período 1 (C.2.5)**



**Figura 30 – Preço da energia nas EC por período 2 (C.2.5)**

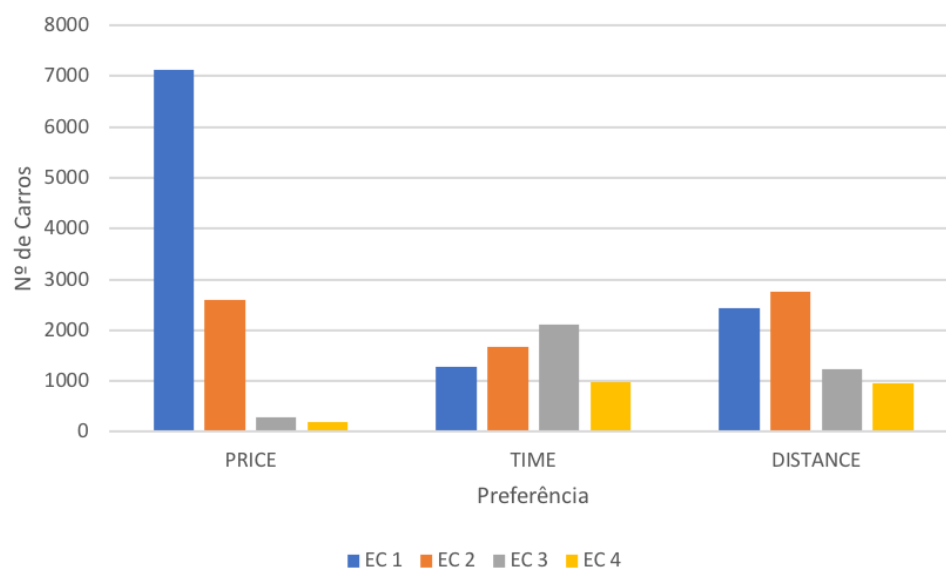
#### **4.2.6. SÍNTESE DE RESULTADOS — LMPs**

Nas Figuras 31 e 32 é visível a aderência dos utilizadores às EC consoante a sua preferência. Quando a variável com maior peso é o preço os utilizadores frequentaram mais a EC 1 e menos as 3 e 4, que são as de carregamento rápido, com os preços mais elevados.



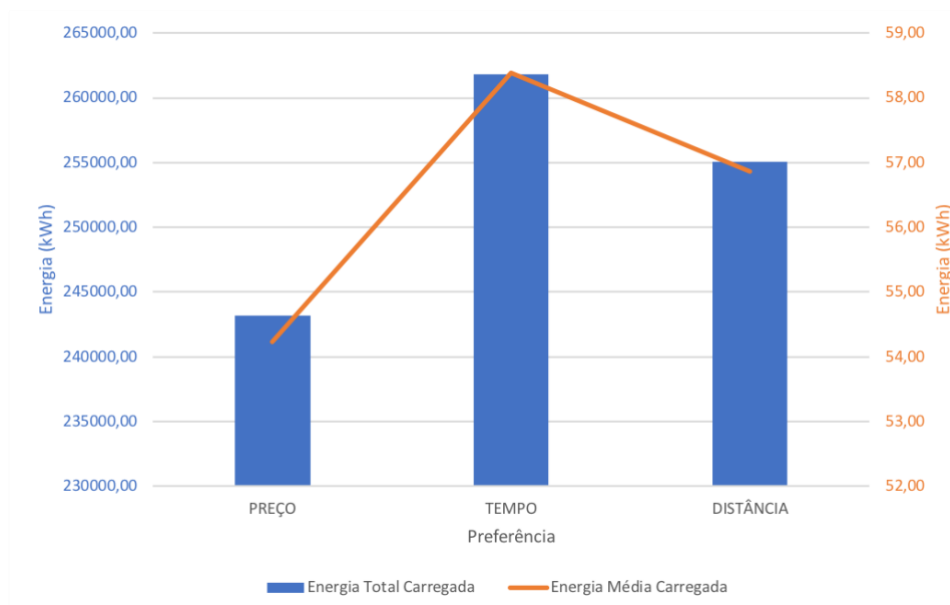
**Figura 31 – Aderência às EC consoante a preferência**

Preferindo o tempo de carregamento em detrimento de todas as outras variáveis, os utilizadores optaram mais pelas EC rápido. Ainda assim, a diferença, comparativamente com as de carregamento normal, é baixa. No caso da preferência pela distância, a distribuição dos VEs cai mais para as EC normal (Figura 32).



**Figura 32 - Aderência às EC consoante a preferência 2**

Na Figura 33 é possível observar a energia total consumida pelos utilizadores de VEs para cada uma das preferências, na população de 5000 VEs.



**Figura 33 – Energia total e média carregada para cada preferência**

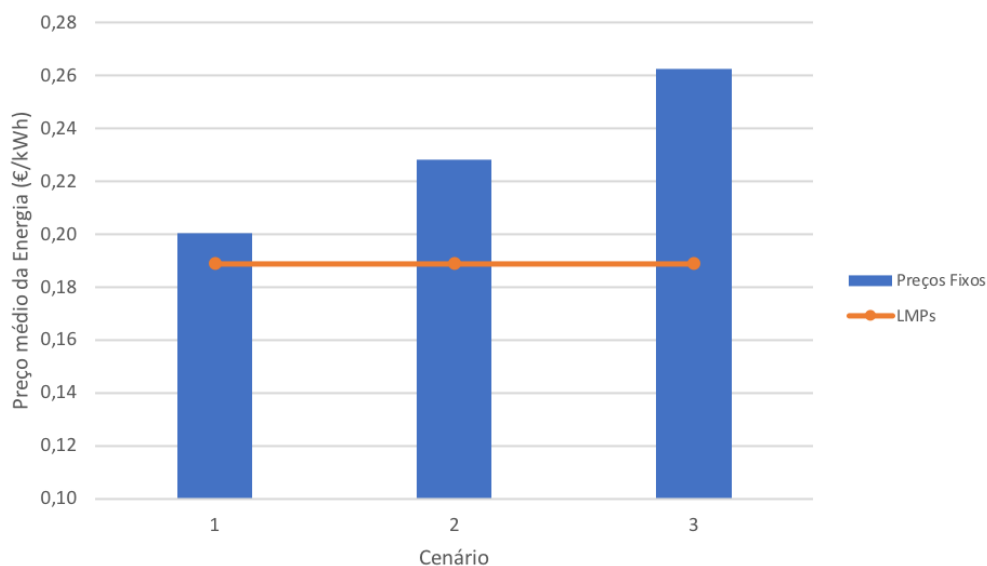
### **4.3. PREÇOS FIXOS VS. PREÇOS VARIÁVEIS**

O objetivo desta dissertação passa por perceber se os preços dinâmicos podem ser mais compensatórios para os utilizadores de VEs, em comparação com uma tarifa fixa. Nesta secção os resultados das simulações entre preços fixos e dinâmicos são comparados de forma a perceber quais as diferenças e se será benéfico optar por tarifas variáveis ou fixas.

#### **4.3.1. POPULAÇÃO DE 5000 VES**

Relativamente às simulações em que a população tem maioritariamente preferência pelo preço, foram registadas diferenças. Numa análise de sensibilidade, observando a Figura 34, pode-se concluir que os utilizadores conseguem pagar menos em média pelo preço da energia – 0,19 €/kWh - comparativamente a todas as simulações com preços fixos.

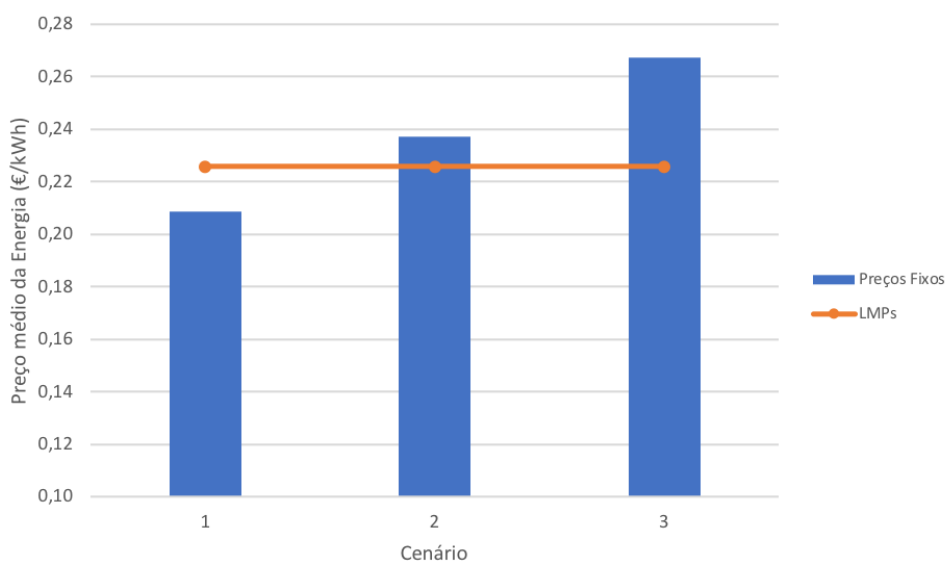




**Figura 34 – Análise de sensibilidade para a preferência do preço (5000 VEs)**

Além disso, o custo médio da energia é o mais baixo de todos os casos simulados – 10,43 €.

Quando os utilizadores optam por dar prioridade à proximidade da estação de carregamento, começa a ser compensatório optar por tarifas dinâmicas a partir de um preço médio de 0,22 €/kWh (Figura 35). Nas simulações realizadas, apenas o primeiro cenário de preços obteve melhores resultados com preços fixos.



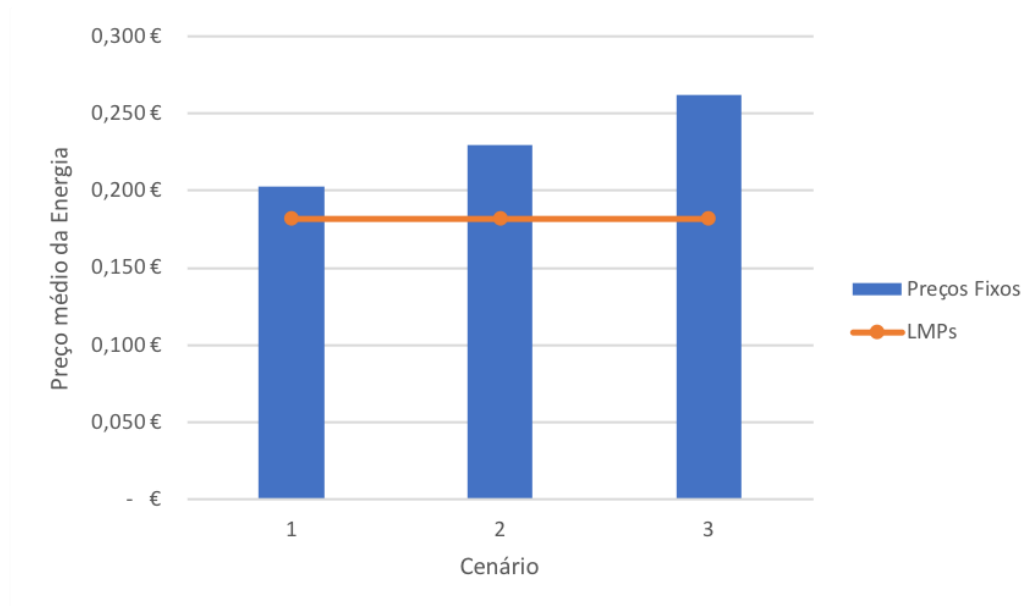
**Figura 35 - Análise de sensibilidade para a preferência de distância (5000 VEs)**

Relativamente à análise de sensibilidade para a preferência pelo tempo de carregamento, não faz sentido realizá-la, uma vez que foram verificados preços irrealistas com os quais não seria de todo vantajoso optar pelas tarifas dinâmicas.

#### 4.3.2. POPULAÇÃO DE 2500 VES

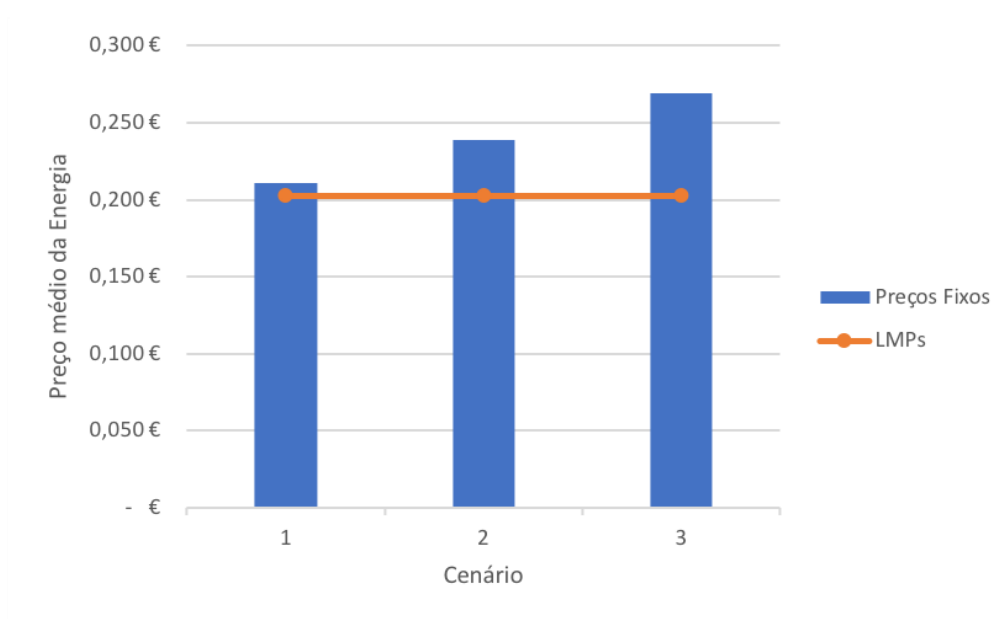
Quando utilizada uma população inferior, de 2500 VEs, observam-se resultados um pouco diferentes. Nesta situação, os preços dinâmicos são ainda inferiores comparativamente às situações da população de 5000 VEs.

Quando a preferência dos utilizadores recai sobre o preço da energia, verifica-se ser benéfico optar pelas tarifas dinâmicas. O preço médio da energia é de 0,18 €/kWh, menor que em todas as simulações com cenários de preços fixos diferentes, como se observa na Figura 36.



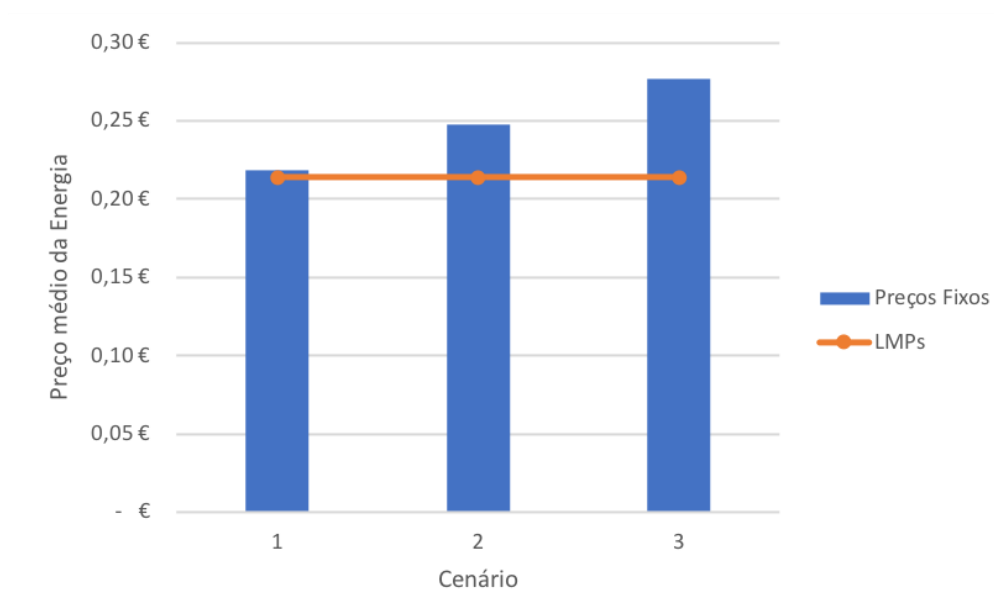
**Figura 36 - Análise de sensibilidade para a preferência de preço (2500 VEs)**

No caso da preferência pela distância, continua a ser compensatório optar por preços dinâmicos, com o preço da energia ser 0,20 €/kWh (Figura 37).



**Figura 37 - Análise de sensibilidade para a preferência de distância (2500 VEs)**

Com a população de 2500 VEs já é possível analisar a preferência pelo tempo de carregamento. Aqui também se verifica o mesmo que nas situações anteriores e, apesar das EC rápido serem mais utilizadas, os LMPs continuam a ser mais vantajosos comparativamente às tarifas de preço fixas (Figura 38).

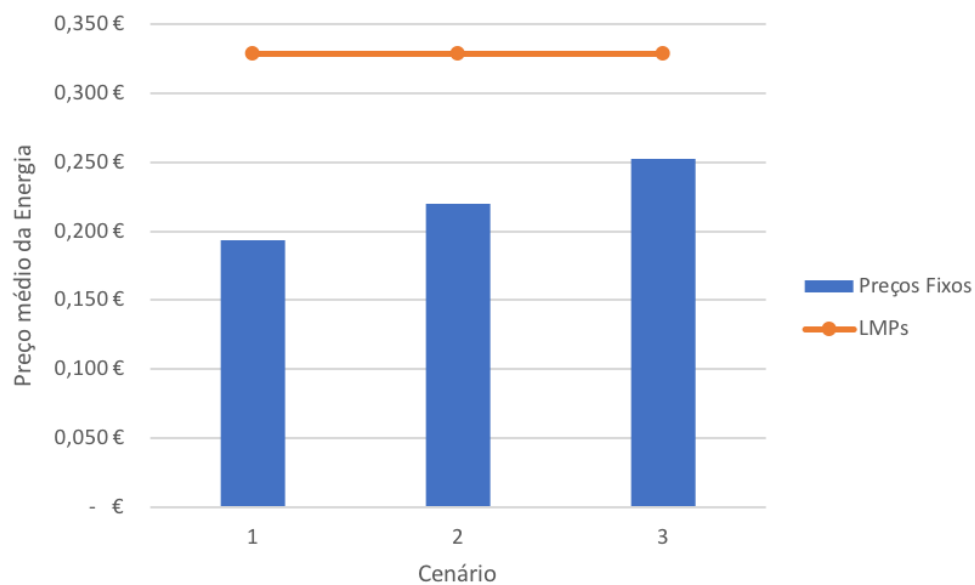


**Figura 38 - Análise de sensibilidade para a preferência de tempo (2500 VEs)**

No Cenário 1, onde os preços fixos são os mais baixos das simulações realizadas, os LMPs conseguem ser 1 cêntimo mais baixos, 0,21 €/kWh.

#### 4.3.3. POPULAÇÃO DE 7000 VEs

Na simulação com 7000 VEs verifica-se que, comparativamente com os casos em que se usam preços fixos, não existe nenhum cenário em que seja compensatório utilizar os LMPs, como se pode observar na Figura 39. É perceptível que esta rede em questão, não tem capacidade para receber energia proveniente desta quantidade de veículos, o que se reflete em preços da energia bastante mais elevados que o normal.



**Figura 39 - Análise de sensibilidade para a preferência de preço (7000 VEs)**

(Página intencionalmente deixada em branco)

## 5. CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais sobre a dissertação realizada. São também realizadas sugestões de trabalhos futuros com o objetivo de melhorar o presente e promover a continuação deste tema.

### 5.1. CONCLUSÕES FINAIS

O trabalho realizado nesta dissertação focou-se no estudo do comportamento dos utilizadores de veículos elétricos. A forma como decidem carregar o seu veículo causa mudanças nas respostas da rede de distribuição. Neste caso o objetivo passou por obter respostas relativamente às mudanças dos preços da energia, influenciados pelos comportamentos dos utilizadores.

Inicialmente foram realizadas simulações utilizando preços com tarifas fixas, constantes para todos os períodos. Aqui, o objetivo foi perceber os valores de carga, custos e outros dados que seriam esperados alterando a forma como os condutores carregam os seus veículos elétricos. Foram assumidas três variáveis que influenciam os utilizadores no carregamento – preço da energia, proximidade do local de carregamento e tempo de carregamento. Ainda, para cada uma destas preferências, as simulações foram realizadas com três níveis diferentes de preços. Estas simulações serviram de comparação com os casos de estudo usando preços dinâmicos.

Nas simulações realizadas com tarifas fixas, as diferenças mais visíveis entre os diferentes níveis de preços foram os encargos com a energia carregada, como seria esperado. Quando a preferência dos utilizadores recai sobre o preço da energia, as estações de carregamento com os preços mais baixos, são as que tem uma maior aderência. Em contraste, quando a preferência recai sobre o tempo de carregamento, os utilizadores optam mais vezes pelas estações de carregamento rápido e, como consequência, existe uma maior procura da energia devido à elevada potência destas estações.

Os casos de estudo que envolveram os LMPs, permitindo obter preços de energia dinâmicos, mostraram resultados diferentes. Foi possível observar uma maior influência nas decisões de carregamento, comparativamente às tarifas fixas. As estações de carregamento normais, principalmente a EC 1 foram escolhidas com uma grande diferença das estações de carregamento rápido. O facto de estas últimas estarem um pouco mais afastadas dos destinos frequente dos utilizadores, também influenciou as decisões. O caso de estudo em que o tempo de carregamento é prioritário mostrou ser o mais problemático, isto devido à elevada energia requisitada à rede. Ao aderirem a estações de carregamento rápido, com potência elevada, os preços de energia retornados pelo modelo de operação de rede, foram demasiado elevados para serem considerados realistas. Houve um período em que o preço da energia atingiu os 1000 €/kWh, algo irrealista. A rede ficou congestionada em demasia para o que são os seus limites. O mesmo se verificou para a simulação realizada com uma população de 7000 veículos. No entanto, quando realizadas simulações com populações menores, como foi o caso, utilizando 2500 VEs, obtiveram-se resultados mais razoáveis e realistas. Isto pode demonstrar que a rede em questão não está preparada para enormes quantidades de energia a circular nas linhas e, ao mesmo tempo, realçar que a introdução de VEs nas estradas tem de ser estudado aprofundadamente, uma vez que o seu impacto nas redes é considerável.

De modo geral, a introdução de preços dinâmicos no mercado energético demonstra ser promissor no sentido de oferecer aos utilizadores de VEs mais opções no momento de decidir qual o local mais apropriado para carregar o VE. Comparativamente com uma tarifa fixa, este estudo demonstra que os utilizadores conseguem reduzir a sua fatura ao existirem tarifas dinâmicas. No entanto também se verifica que os tempos de carregamento baixos, que é algo que os utilizadores poderão favorecer, especialmente considerando que é algo que estão habituados quando utilizam combustíveis fósseis, poderão causar problemas na rede de distribuição.

## 5.2. TRABALHOS FUTUROS

Este é um tema que deverá continuar a ser investigado, mostrando-se bastante interessante e relevante não só na área científica, mas também na comunidade, considerando este ser um futuro muito próximo.

O trabalho desenvolvido pode ser alvo de futuras melhorias e alterações de modo a obter resultados mais realistas e precisos. No sentido de continuar a melhorar este trabalho, alguns acréscimos no algoritmo e na metodologia serão capazes de fornecer dados ainda mais interessantes, passando pela conquista de alguns objetivos:

- Acrescentar um método de decisão de carregamento consoante o preço da energia e não o nível de carga da bateria, ou seja, que o fator determinante para se um utilizador vá ou não carregar seja o preço atual da energia no mercado;
- Criar mais perfis de utilizadores (perfis de condução, características individuais que influenciem o carregamento, etc.), adaptados para os diferentes dias da semana;
- Utilizar uma cidade maior e mais detalhada, com mais estações de carregamento e com posições mais otimizadas;
- Criar um modelo de otimização para os custos, isto é, um modelo ótimo que planeie todo o seu trajeto diário e os locais exatos para carregar o veículo de forma a minimizar os custos;
- Melhorar o método de decisão do local de carregamento, incluindo o preço da energia em casa como variável de decisão;
- Considerar limite de veículos por estação de carregamento;
- Adaptar o simulador de forma a ser possível analisar o impacto na rede elétrica;
- Utilizar limites nos preços da energia de modo a evitar resultados que reflitam preços irrealistas.



### **5.3.   CONTRIBUTOS**

Este trabalho contribuiu para o programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia, no âmbito do acordo de subvenção Marie Skłodowska-Curie n.º 641794 (projeto DREAM-GO). Além disso, este trabalho beneficiou de ideias da proposta do projeto recentemente financiado com ref. POCI-01-0145-FEDER-028983 – CENERGETIC.

## *Referências Documentais*

- [1] UNFCCC. Conference of the Parties (COP), “Paris Climate Change Conference- November 2015, COP 21,” 2015.
- [2] European Commission, “Greenhouse gas emission statistics - emission inventories - Statistics Explained.” [Online]. Available: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse\\_gas\\_emission\\_statistics\\_-\\_emission\\_inventories](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse_gas_emission_statistics_-_emission_inventories). [Accessed: 08-Mar-2018].
- [3] F. Salah, J. P. Ilg, C. M. Flath, H. Basse, and C. van Dinther, “Impact of electric vehicles on distribution substations: A Swiss case study,” *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 88–96, 2015.
- [4] European Environment Agency, “Electric vehicles and the energy sector - impacts on Europe’s future emissions,” *Eea.Europa.Eu*, pp. 1–5, 2016.
- [5] N. Daina, A. Sivakumar, and J. W. Polak, “Electric vehicle charging choices: Modelling and implications for smart charging services,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 81, pp. 36–56, 2017.
- [6] C. Latinopoulos, A. Sivakumar, and J. W. Polak, “Response of electric vehicle drivers to dynamic pricing of parking and charging services: Risky choice in early reservations,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 80, pp. 175–189, 2017.
- [7] Electric Vehicles News, “History of Electric Cars Electric Vehicles News.” .
- [8] “History of American Roads and the First Federal Highway.” [Online]. Available: <https://www.thoughtco.com/history-of-american-roads-4077442>. [Accessed: 09-Mar-2018].
- [9] “Lincoln Highway Association: Resources.” [Online]. Available: <https://www.lincolnhighwayassoc.org/info/>. [Accessed: 09-Mar-2018].
- [10] “Charles Kettering receives patent for electric self-starter - Aug 17, 1915 -

- HISTORY.com.” [Online]. Available: <https://www.history.com/this-day-in-history/charles-kettering-receives-patent-for-electric-self-starter>. [Accessed: 09-Mar-2018].
- [11] C. N. Brown, “The History of Electric Wires and Cables,” *IEE Proc. A Phys. Sci. Meas. Instrumentation, Manag. Educ. Rev.*, vol. 132, no. 1, p. 75, 1985.
  - [12] “Global EV Outlook 2018,” 2018.
  - [13] EV-BOX, “Manifesto of Electric Mobility,” 2017.
  - [14] M. E. El-Hawary, “The smart grid - State-of-the-art and future trends,” *Electr. Power Components Syst.*, vol. 42, no. 3–4, pp. 239–250, 2014.
  - [15] A. Vaccaro, G. Velotto, and A. F. Zobaa, “A decentralized and cooperative architecture for optimal voltage regulation in smart grids,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 10, pp. 4593–4602, 2011.
  - [16] E. April, “Complementary emission estimates produced by EU organisations,” pp. 1–9.
  - [17] S. S. Raghavan and A. Khaligh, “Impact of plug-in hybrid electric vehicle charging on a distribution network in a Smart Grid environment,” *2012 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol.*, pp. 1–7, 2012.
  - [18] J. García-Villalobos, I. Zamora, J. I. San Martín, F. J. Asensio, and V. Aperribay, “Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 717–731, 2014.
  - [19] W. Kempton and J. Tomić, “Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue,” *J. Power Sources*, vol. 144, no. 1, pp. 268–279, 2005.
  - [20] U. DESA, “World population projected to reach 9.7 billion by 2050 | UN DESA | United Nations Department of Economic and Social Affairs,” *UN Department of Economic and Social Affairs*, 2015. [Online]. Available: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>. [Accessed: 27-Jun-2018].

- [21] I. Pes, “2018 Re-imagining the Electric Grid.”
- [22] C. Yin, Z. Xiong, H. Chen, J. Wang, D. Cooper, and B. David, “A literature survey on smart cities,” *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 58, no. 10, pp. 1–18, 2015.
- [23] M. Eremia, L. Toma, and M. Sanduleac, “The Smart City Concept in the 21st Century,” *Procedia Eng.*, vol. 181, pp. 12–19, 2017.
- [24] C. Corchero, S. González-Villafranca, and M. Sanmartí, “European electric vehicle fleet: Driving and charging data analysis,” *2014 IEEE Int. Electr. Veh. Conf. IEVC 2014*, no. Figure 1, 2015.
- [25] T. Franke and J. F. Krems, “Understanding charging behaviour of electric vehicle users,” *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 21, pp. 75–89, 2013.
- [26] C. Marmaras, E. Xydias, and L. Cipcigan, “Simulation of electric vehicle driver behaviour in road transport and electric power networks,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 80, pp. 239–256, 2017.
- [27] J. Neubauer and E. Wood, “The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility,” *J. Power Sources*, vol. 257, pp. 12–20, 2014.
- [28] M. A. Nicholas, J. Woodjack, and G. Tal, “California Statewide Charging Assessment Model for Plug-in Electric Vehicles : Learning from Statewide Travel Surveys,” *Inst. Transp. Stud.*, no. January, pp. 1–24, 2013.
- [29] D. Krajzewicz, J. Erdmann, M. Behrisch, and L. Bieker, “Recent Development and Applications of {SUMO - Simulation of Urban MObility},” *Int. J. Adv. Syst. Meas.*, vol. 5, no. 3, pp. 128–138, 2012.
- [30] K. W. Axhausen, *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. 2016.
- [31] J. Sewall, D. Wilkie, P. Merrell, and M. C. Lin, “Continuum traffic simulation,” *Comput. Graph. Forum*, vol. 29, no. 2, pp. 439–448, 2010.
- [32] B. Chen and H. H. Cheng, “A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 11, no. 2, pp. 485–

497, 2010.

- [33] M. Strehler, S. Merting, and C. Schwan, “Energy-efficient shortest routes for electric and hybrid vehicles,” *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 103, pp. 111–135, 2017.
- [34] P. Demand, P. Production, E. Cost, and S. Platform, “SIMULATION PLATFORM FOR COORDINATED CHARGING OF ELECTRIC,” pp. 8–11, 2015.
- [35] S. Bae and A. Kwasinski, “Spatial and Temporal Model of Electric Vehicle Charging Demand,” vol. 3, no. 1, pp. 394–403, 2012.
- [36] J. Soares, B. Canizes, C. Lobo, Z. Vale, and H. Morais, “Electric vehicle scenario simulator tool for smart grid operators,” *Energies*, vol. 5, no. 6, pp. 1881–1899, 2012.
- [37] A. Brooker, J. Gonder, L. Wang, E. Wood, S. Lopp, and L. Ramroth, “FASTSim: A Model to Estimate Vehicle Efficiency , Cost and Performance,” in *SAE Technical Paper*, 2015, no. April, pp. 21–23.
- [38] “V2G-Sim.” [Online]. Available: <http://v2gsim.lbl.gov/>. [Accessed: 01-Sep-2018].
- [39] S. Alegre, J. V. Miñiguez, and J. Carpio, “Modelling of electric and parallel-hybrid electric vehicle using Matlab/Simulink environment and planning of charging stations through a geographic information system and genetic algorithms,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, no. January 2016, pp. 1020–1027, 2017.
- [40] S. Prabhakar Karthikeyan, I. Jacob Raglend, and D. P. Kothari, “A review on market power in deregulated electricity market,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 48, no. 1, pp. 139–147, 2013.
- [41] “FAQs: Locational Marginal Pricing.” [Online]. Available: <https://www.iso-ne.com/participate/support/faq/lmp>. [Accessed: 11-Sep-2018].
- [42] “Locational Marginal Pricing PJM Interconnection uses a system called locational marginal pricing to establish the price of energy purchases and sales in the PJM wholesale electricity market . system in determining the price of electricity at different loc,” p. 19403, 2015.
- [43] RStudio, “Home - RStudio,” 2015. [Online]. Available: <https://www.rstudio.com/>.

[Accessed: 01-Sep-2018].

- [44] B. Canizes, T. Pinto, J. Soares, Z. Vale, P. Chamoso, and D. Santos, “Smart City: A GECAD-BISITE Energy Management Case Study,” vol. 641794, no. 641794, 2018, pp. 92–100.

