

# **Sistema Hierárquico de Gestão de Energia em Parques de Estacionamento**

**Duarte José Rodrigues Mendes da Silva**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Orientador: Prof. Hugo Gabriel Valente Morais

## **Júri**

Presidente: Prof. Célia Maria Santos Cardoso de Jesus

Orientador: Prof. Hugo Gabriel Valente Morais

Vogais: Dr. Amâncio Lucas de Sousa Pereira

**Novembro 2021**

## **Declaração**

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

# **Agradecimentos**

A realização desta dissertação marca o fim do meu percurso académico no Instituto Superior Técnico. Não posso deixar passar este momento sem agradecer a todos os que me acompanharam neste percurso.

Ao professor Hugo Morais pela excelente orientação, pela disponibilidade e motivação ao longo de toda a presente dissertação. O meu sincero obrigado! Agradeço igualmente ao Eng.º NASSAR Naji pela orientação e conhecimento transmitido.

Aos meus pais, Cristina e Almiro, aos meus irmãos Francisco e Margarida e aos meus avós Alda e João, Alice e Almiro, por me terem apoiado e motivado nos momentos de sucesso e de fracasso.

Ao Guilherme, ao Miguel e ao Pedro por todo o companheirismo, amizade e apoio ao longo destes anos.

## Resumo

Desde o início do século XXI, devido ao aumento das preocupações ambientais, tem-se registado um aumento significativo da utilização de veículos elétricos. Para fazer face a este aumento, a indústria automóvel enfrenta um grande desafio por forma a desenvolver esforços para se adaptarem à nova realidade, isto é, alterando a sua produção de veículos de motores a combustão interna para veículos movidos a motor elétrico. Esta mudança de paradigma traz inúmeros desafios básicos para a sociedade atual, entre eles o facto das infraestruturas que atualmente suportam o carregamento de carros elétricos não se encontrarem preparadas para acompanhar o incremento previsto na procura de consumo de eletricidade.

É do conhecimento geral que os veículos elétricos passam a maioria do seu tempo de vida estacionados, sendo esta a melhor oportunidade para efetuar o carregamento dos mesmos. Desta forma, existe uma necessidade real de otimizar o uso de energia em parques de estacionamento.

Esta tese tem como objetivo desenvolver um sistema de gestão hierárquico para gestão do uso de energia elétrica nos parques de estacionamento, de forma a resolver a falta de capacidade da própria rede em suportar a energia requerida devido ao aumento da utilização de veículos elétricos. Assim, o sistema tira partido do facto dos veículos permanecerem estacionados e com possibilidade de serem carregados durante longos períodos de tempo, carregando-os de forma inteligente e coordenada. Este sistema consiste numa ferramenta de gestão hierárquica com dois níveis de gestão, que é responsável por gerir o carregamento dos veículos e o estacionamento dos mesmos.

**Palavras-chave:** Parques de Estacionamento, Sistema de Controlo Hierárquico, *vehicle-to-grid*, Veículos elétricos.

## **Abstract**

Since the beginning of the XXI century, due to the increased of environmental concerns, there has been a significant increase in the use of electric vehicles. Thus, the automotive industry faced a considerable challenge to develop efforts to adapt to the new reality, changing its production of vehicles from internal combustion engines to electric-powered vehicles. This paradigm shift brings numerous fundamental obstacles to society. The infrastructures that currently support electric vehicle charging are not prepared to keep up with the expected increase in the electricity demand.

It is known that electric vehicles spend most of their time parked, and this is the best opportunity to charge them. Thus, there is a real need to optimize the use of energy in car parking lots.

The present thesis aims to develop a system to manage the use of energy in parking lots to solve the lack of capacity of the network itself to support the power demand with the increased use of electric vehicles. Therefore, the system assumes that the vehicles remain parked and can be charged for long periods, charging them in an intelligent and coordinated way. The proposed system consists of a hierarchical management system with two optimization levels, which is responsible for managing the charging of the vehicles and the parking of the same.

**Keywords:** Electric vehicles, Parking lots, Hierarchical management systems, Vehicle-to-grid

# Índice

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Agradecimentos</b> .....   | <b>iii</b>  |
| <b>Resumo</b> .....   | <b>iv</b>   |
| <b>Abstract</b> .....   | <b>v</b>    |
| <b>Índice</b> .....   | <b>vi</b>   |
| <b>Índice de figuras</b> .....  | <b>ix</b>   |
| <b>Índice de tabelas</b> .....  | <b>xii</b>  |
| <b>Abreviaturas</b> .....   | <b>xiii</b> |
| <b>Nomenclatura</b> .....   | <b>xiv</b>  |
| <b>1. Introdução</b> .....  | <b>1</b>    |
| 1.1. Motivação .....  | 1           |
| 1.2. Contribuições.....   | 3           |
| 1.3. Estrutura da Tese .....  | 4           |
| <b>2. Estado da Arte</b> .....  | <b>5</b>    |
| 2.1. Paradigma Atual dos Veículos Elétricos .....                         | 5           |
| 2.2. Baterias de Veículos Elétricos .....                                 | 6           |
| 2.3. Carregamento de veículos elétricos .....                             | 7           |
| 2.4. Parque de estacionamento.....  | 9           |
| 2.4.1. Algoritmos de controlo de carregamento de veículos elétricos ..... | 10          |
| 2.4.2. Integração de Recurso Renováveis .....                             | 12          |
| 2.4.3. Tecnologia vehicle-to-grid.....                                    | 13          |
| 2.5. Considerações gerais sobre o estado da arte.....                     | 13          |
| <b>3. Metodologia</b> .....   | <b>15</b>   |
| 3.1. Introdução.....  | 15          |
| 3.1.1. Softwares Utilizados .....   | 17          |
| 3.2. Primeiro Nível .....   | 18          |
| 3.2.1. Metodologia 1 – “Dia Seguinte” .....                               | 19          |
| 3.2.2. Função Objetivo.....   | 19          |
| 3.2.3. Restrições .....   | 20          |
| 3.2.1. Metodologia 2 - “Duração do Estacionamento” .....                  | 22          |
| 3.2.1.1. Função Objetivo.....   | 24          |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.2.1.2. Restrições .....  | 25        |
| 3.3. Segundo Nível .....   | 29        |
| 3.3.1. Função objetivo .....   | 29        |
| 3.3.2. Restrições .....  | 30        |
| 3.3.3. Interligação entre o primeiro e segundo nível de otimização .....   | 30        |
| <b>4. Construção de Cenários .....</b>                                     | <b>32</b> |
| 4.1. Parâmetros dos Cenários .....   | 32        |
| 4.2. Padrões de utilizadores identificados .....                           | 32        |
| 4.3. Geração dos Cenários .....  | 34        |
| <b>5. Casos de Estudo .....</b>  | <b>36</b> |
| 5.1. Introdução .....  | 36        |
| 5.2. Metodologia “Dia Seguinte” .....                                      | 37        |
| 5.2.1. CE 1.1 - Parque Pendular .....                                      | 37        |
| 5.2.2. CE 1.2 - Parque em Zona Empresarial .....                           | 41        |
| 5.2.3. Conclusão dos CEs – “Dia Seguinte” .....                            | 46        |
| 5.3. Metodologia “Duração da Estadia” .....                                | 46        |
| 5.3.1. CE 2.1 - Parque Empresarial .....                                   | 47        |
| 5.3.2. CE 2.2 - Estacionamento de Veículos .....                           | 54        |
| 5.3.3. CE 2.3 - Estudo dos Circuitos .....                                 | 56        |
| 5.3.1. Conclusão dos CEs – “Duração da Estadia” .....                      | 57        |
| 5.4. Análise da performance – “Dia Seguinte” vs “Duração da Estadia” ..... | 58        |
| 5.4.1. Diferenças no carregamento de veículos .....                        | 58        |
| 5.4.2. Tempo de execução da otimização .....                               | 59        |
| 5.4.3. Conclusão .....   | 60        |
| 5.5. Sistema Hierárquico .....   | 60        |
| 5.5.1. CE 3.1 - Parque Empresarial .....                                   | 61        |
| 5.5.2. CE 3.2 - Interligação entre os níveis de otimização .....           | 63        |
| 5.5.3. CE 3.3 - Correções em tempo real .....                              | 65        |
| 5.5.4. CE 3.3 – Parque empresarial de 50 EVs .....                         | 66        |
| 5.5.5. Conclusão dos CEs – Sistema Hierárquico .....                       | 67        |
| <b>6. Conclusão e Trabalho Futuro .....</b>                                | <b>68</b> |
| 6.1. Conclusões .....  | 68        |
| 6.2. Trabalho Futuro .....   | 69        |
| <b>7. Referências .....</b>  | <b>71</b> |





# Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Consumo Final Mundial de 1973-2018 [1].   | 1  |
| Figura 2 - Consumo de combustíveis fósseis por setor [1].  | 2  |
| Figura 3 - Demanda de eletricidade da frota de veículos 2019 e 2030 [6].                               | 3  |
| Figura 4 - Vendas de Veículos Elétricos nos países membros da EU e EFTA [17].                          | 6  |
| Figura 5 - Diferentes tipos de fichas a) Yazaki b) Mennekes c) Scama.                                  | 9  |
| Figura 6 - Balanço da Produção de Eletricidade de Portugal Continental - janeiro a agosto de 2021[41]. | 12 |
| Figura 7 - Esquemático da estrutura da tecnologia vehicle-to-grid.                                     | 13 |
| Figura 8 - Esquema Resumo da Metodologias Propostas.   | 15 |
| Figura 9 - Princípio Geral da Hierarquia de Níveis.  | 17 |
| Figura 10 - Estrutura da conectividade entre softwares.  | 18 |
| Figura 11 - Estrutura da conectividade entre os softwares - Versão "Dia Seguinte".                     | 19 |
| Figura 12 - Dados e parâmetros dos VEs, dos CS e do Parque de Estacionamento.                          | 23 |
| Figura 13 - Esquemático ilustrativo da definição do período de otimização.                             | 23 |
| Figura 14-Estrutura da conectividade entre os softwares - Versão "Duração do Estacionamento".          | 24 |
| Figura 15 - Esquemático ilustrativo do conceito de "Circuito".   | 25 |
| Figura 16 - Evolução da Corrente e Tensão absorvida por uma célula de Lítio ao longo do tempo[48].     | 27 |
| Figura 17 - Número de Vendas de BEVs e PHEVs em Portugal [51].   | 33 |
| Figura 18 - Capacidade Máxima das Baterias de cada Modelo [47].  | 33 |
| Figura 19- Esquemático da ferramenta de geração de cenários.   | 35 |
| Figura 20 - Diagrama Temporal da Potência Ativa de Carregamento de cada EV– CE 1.1.                    | 39 |
| Figura 21- Diagrama Temporal do Estado de Bateria de cada EV– CE 1.1.                                  | 40 |
| Figura 22- Diagrama Temporal do Estado da Bateria do Veículo com Menos Carga– CE 1.1.                  | 41 |
| Figura 23-Diagrama Temporal da Potência Ativa de Carregamento de cada CS e do Parque– CE 1.1.          | 41 |
| Figura 24- Gráfico da ocupação do parque ao longo dos períodos- CE 1.2.                                | 42 |
| Figura 25 - Potência Ativa de Carregamento do Veículo 3– CE 1.2.                                       | 44 |
| Figura 26-Diagrama da Evolução Temporal do Estado das Baterias– CE 1.2.                                | 44 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 27 - Tempo de Execução da metodologia "Dia Seguinte" em função dos veículos do problema.<br>.....  | 46 |
| Figura 28 - Diagrama da Evolução Temporal do Estado das Baterias– CE 2.1. ....  | 48 |
| Figura 29 - Evolução Temporal da Potência de Carregamento ao EV 3 e EV 5- CE 2.1. ....  | 49 |
| Figura 30- Diagrama da Evolução Temporal da Potência de Carregamento do Escalonamento Efetuado<br>as 7h45 vs 8h00 - CE 2.1. ....  | 50 |
| Figura 31 - Diagrama da Evolução Temporal da Potência consumida pelo parque, $P_{total}$ , da Potência<br>consumida por cada EC e da potência fornecida pelo EV 1- CE 2.1. .... | 51 |
| Figura 32 - (a) Diagrama da Evolução Temporal do Estado da Bateria EV 1 (b) Diagrama da Evolução<br>da Potência de Carregamento do EV 1 - CE 2.1. ....                          | 51 |
| Figura 33 - Diagrama da Evolução Temporal do Estado das Baterias- CE 2.1. ....  | 52 |
| Figura 34-Diagrama da Evolução Temporal da Potência consumida pelo parque, $P_{total}$ , da Potência<br>consumida por cada EC e da potência fornecida pelo EV 1 - CE 2.1. ....  | 53 |
| Figura 35 - (a) Diagrama da Evolução Temporal do Estado da Bateria EV 1 (b) Diagrama da Evolução<br>da Potência de Carregamento do EV 1 - CE 2.1. ....                          | 53 |
| Figura 36- Diagrama temporal da evolução da potência do parque de estacionamento e da potência<br>proveniente das baterias dos EVs - CE 2.1. ....                               | 54 |
| Figura 37 - Escalonamento da potência ativa de carregamento do EV 1 às 9h30 - CE 2.2. ....  | 55 |
| Figura 38-Escalonamento da potência ativa de carregamento do EV 1 e EV 2 às 9h45 - CE 2.2.....  | 55 |
| Figura 39- Escalonamento da potência ativa de carregamento do EV 1, EV 2 e EV3 às 10h30 - CE 2.2.<br>.....  | 56 |
| Figura 40- Escalonamento da potência ativa de carregamento do EV 1, EV 2 e EV3 às 10h30 – sem<br>estacionamento - CE 2.2. ....  | 56 |
| Figura 41 - Evolução da potência ativa de carregamento da CS1 e CS2, respeitando o limite da potência<br>ativa do circuito que estão integradas - CE 2.3. ....                  | 57 |
| Figura 42 - Gráfico comparativo da potência ativa de carregamento do EV 5 no parque pendular. ....  | 58 |
| Figura 43 - Gráfico comparativo do perfil desenhado para a potência ativa de carregamento do EV 6<br>nas metodologias "Dia Seguinte" e "Duração da Estadia". ....               | 59 |
| Figura 44 - Evolução do tempo de execução da otimização em função o número de veículos. ....  | 60 |
| Figura 45 - Diagrama da evolução da potência consumida pelo parque CE 3.1. ....   | 63 |
| Figura 46- Potência ativa de descarga do EV 1 atribuída pelo segundo nível de otimização - CE 3.2.<br>.....   | 63 |
| Figura 47-Potência ativa de descarga do EV 5 atribuída pelo segundo nível de otimização - CE 3.2.   | 64 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 48 – (a) Diagrama do escalonamento da potência ativa de carregamento dos EVs 1 e 2 (b) Diagrama temporal estado das baterias dos EVs 1 e 2 - CE 3.3.....                 | 65 |
| Figura 49- (a) Diagrama da evolução temporal potência ativa de carregamento dos EVs 1 e 2 (b) Diagrama temporal da evolução do estado das baterias dos EVs 1 e 2 - CE 3.3. .... | 66 |
| Figura 50 - Diagrama temporal da potência ativa total consumida pelo parque.....  | 66 |

## Índice de tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Comparação dos parâmetros das baterias mais utilizadas.....  | 7  |
| Tabela 2 - Tabela comparativa da Corrente Máxima, Potência de Carregamento Máxima de Corrente [23].....               | 8  |
| Tabela 3 - Modos de sistema de carregamento segundo a Comissão Internacional de Eletromecânica. ....                  | 9  |
| Tabela 4-- Caracterização dos Casos de Estudo. ....   | 37 |
| Tabela 5 - Caracterização do Cenário 1 - Caso de Estudo 1.....  | 38 |
| Tabela 6 - Caracterização do perfil dos utilizadores – CE 1.1. ....   | 38 |
| Tabela 7 - Caracterização dos Estados das Baterias dos veículos– CE 1.1. ....   | 39 |
| Tabela 8 - Caracterização do CE 1.2. ....   | 42 |
| Tabela 9- Caracterização do perfil dos utilizadores - CE 1.2. ....  | 43 |
| Tabela 10- Caracterização dos Estados das Baterias dos veículos – CE 1.2. ....  | 44 |
| Tabela 11- Caracterização dos Estados das Baterias dos veículos – Sistema não controlável - CE 1.2. ....              | 45 |
| Tabela 12- Caracterização do CE 2.1. ....   | 47 |
| Tabela 13- Descrição dos valores do SOC <sub>i</sub> , SOC <sub>req</sub> e SOC <sub>f</sub> de cada EV - CE 2.1..... | 49 |
| Tabela 14- Descrição dos valores do SOC <sub>i</sub> , SOC <sub>req</sub> e SOC <sub>f</sub> de cada EV - CE 2.1..... | 52 |
| Tabela 15- Caracterização do Cenário 3 - CE 2.2. ....   | 54 |
| Tabela 16- Caracterização do CE 3.1. ....   | 61 |
| Tabela 17- Descrição dos valores do SOC <sub>i</sub> , SOC <sub>req</sub> e SOC <sub>f</sub> de cada EV - CE 3.1..... | 62 |

## Abreviaturas

|               |  |
|---------------|--|
| <b>AC</b>     | <i>Alternating Current</i> (Corrente Alternada)      |
| <b>APREN</b>  | Associação Portuguesa de Energias Renováveis         |
| <b>BEV</b>    | Veículo Elétrico a Bateria                           |
| <b>CS</b>     | Estação de Carregamento                              |
| <b>DC</b>     | <i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)            |
| <b>EV</b>     | Veículo Elétrico                                     |
| <b>FC</b>     | <i>Fuel Cell</i>                                     |
| <b>FEV</b>    | Veículo Elétrico alimentado por uma <i>Fuel Cell</i> |
| <b>GAMs</b>   | <i>General Algebraic Modeling System</i>             |
| <b>IEC</b>    | Comissão Eletromecânica Internacional                |
| <b>MATLAB</b> | <i>Matrix Laboratory</i>                             |
| <b>PHEV</b>   | Veículo Elétrico Híbrido <i>Plug-in</i>              |

# Nomenclatura

## Parâmetros

|                    |  |
|--------------------|--|
| $CS$               | Estação de carregamento  |
| $Ev$               | Veículo elétrico   |
| $Ev_e$             | Veículo elétrico estacionado   |
| $F_{obj}$          | Função Objetivo  |
| $N_{Circuits}$     | Número de Circuitos instalados no parque de estacionamento   |
| $N_{CS}$           | Número de Estações de Carregamento equipadas no parque de estacionamento                               |
| $N_{EVCS}$         | Número de veículos elétricos por estação de carregamento   |
| $N_{Ev}$           | Número de veículos elétricos   |
| $N_{Eve}$          | Número de veículos elétricos estacionados  |
| $N_{Place}$        | Número de lugares de estacionamento  |
| $Place$            | Lugar de estacionamento  |
| $P_{Chmax}(Ev,t)$  | Potência ativa máxima de carregamento para o veículo $EV$ no período $t$                               |
| $P_{Dchmax}(Ev,t)$ | Potência ativa máxima de descarregamento para o veículo $EV$ no período $t$                            |
| $P_{CSmax}(CS)$    | Potência ativa máxima carregamento e de descarregamento para a estação de carregamento $CS$            |
| $P_{CircuitMax}$   | Potência ativa máxima do circuito  |
| $P_{ParkMax}$      | Potência ativa máxima instalada no parque de estacionamento  |
| $SOC_{i(EV)}$      | Estado da bateria do veículo $EV$ quando este entra no parque de estacionamento                        |
| $SOC_{req(EV)}$    | Estado da bateria do veículo $EV$ que o utilizador requer para quando sair do parque de estacionamento |
| $t$                | Período  |
| $T_{duration}$     | Tempo de duração de cada período da otimização   |
| $t_{i(EV)}$        | Período de entrada do veículo $EV$ no parque de estacionamento   |
| $t_{final(EV)}$    | Período de saída do veículo $EV$ no parque de estacionamento   |
| $t_{lastEv}$       | Período de saída do último $EV$ do parque de estacionamento  |

|                   |   |
|-------------------|---|
| $T_S$             | Período máximo do intervalo de otimização                 |
| $X_{CSe}(CS,Eve)$ | Estação de carregamento CS do veículo estacionado $EVe$   |
| $X_{CSFull}(CS)$  | Estações de carregamento CS que estão totalmente ocupadas |

## Variáveis

|                         |  |
|-------------------------|--|
| $MinSoC(t)$             | Valor da bateria do veículo com menor carga no período $t$                           |
| $P_{Ch}(Ev,t)$          | Potência ativa carregada do veículo $EV$ no período $t$                              |
| $P_{Dch}(Ev,t)$         | Potência ativa descarregada do veículo $EV$ no período $t$                           |
| $P_{PlaceC}(Place,t)$   | Potência ativa carregada no lugar $Place$ no período $t$                             |
| $P_{PlaceD}(Place,t)$   | Potência ativa descarregada no lugar $Place$ no período $t$                          |
| $P_{CS_C}(CS,t)$        | Potência ativa carregada na estação de carregamento CS no período $t$                |
| $P_{CS_D}(CS,t)$        | Potência ativa descarregada na estação de carregamento CS no período $t$             |
| $P_{total}(t)$          | Potência ativa total consumida pelo parque de estacionamento no período $t$          |
| $SoC(Ev,t)$             | Estado da bateria do veículo $EV$ no período $t$                                     |
| $SoC(Ev,t_{final}(Ev))$ | Estado da bateria do veículo $EV$ quando este sai do parque de estacionamento        |
| $\Delta SoC_1(Ev)$      | Energia requerida pelo utilizador do veículo $EV$ durante o estacionamento           |
| $\Delta SoC_2(Ev)$      | Energia fornecida ao veículo $EV$ durante o estacionamento                           |
| $t_{ChEnd1}(Ev)$        | Período que o veículo $EV$ atinge a energia requerida – Primeiro Nível de Otimização |
| $t_{ChEnd2}(Ev)$        | Período que o veículo $EV$ atinge a energia requerida – Segundo Nível de Otimização  |
| $X_{Ch}(Ev,t)$          | Estado de carregamento do veículo $EV$ no período $t$                                |
| $X_{Dch}(Ev,t)$         | Estado de descarregamento do veículo $EV$ no período $t$                             |
| $X_{Che}(Eve,t)$        | Estado de carregamento do veículo $EVe$ no período $t$                               |
| $X_{Dche}(Eve,t)$       | Estado de descarregamento do veículo $EVe$ no período $t$                            |
| $X_{Place}(Place,Ev,t)$ | Lugar do veículo $EV$ no período $t$   |
| $X_{CS}(CS)$            | Estação de carregamento CS do veículo a estacionar                                   |





# 1.Introdução

Este capítulo apresenta a motivação por detrás desta dissertação de mestrado na secção 1.1. Já na secção 1.2. são apresentadas as contribuições científicas deste estudo para a literatura e, por último, na secção 1.3. é descrita a estrutura da tese.

## 1.1. Motivação

Atualmente, os combustíveis fósseis (petróleo, gás e carvão) apresentam-se como as principais fontes de energia no consumo final dos mais diversos setores a nível mundial, como está demonstrado no gráfico da Figura 1. Consequentemente, a elevada dependência dos combustíveis fósseis tem originado um aumento das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) causando alterações estruturais no clima do planeta.

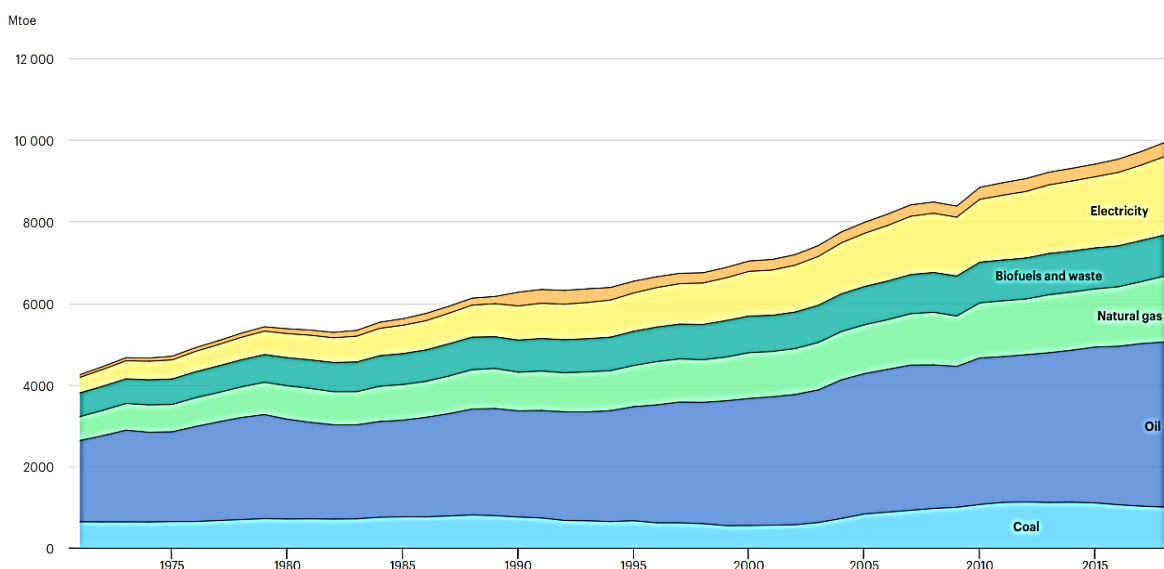


Figura 1 - Consumo Final Mundial de 1973-2018 [1].

Devido ao aumento das preocupações ambientais e com o intuito de diminuir o impacto humano no aumento do efeito de estufa, foram estabelecidas diversas metas por vários governos e organizações com vista a reduzir a emissão de gases poluentes assim como a dependência de combustíveis fósseis.

Uma das metas mencionada no parágrafo anterior é a descarbonização do setor dos transportes [2]. Este sector é essencial para o desenvolvimento das economias e o aumento da qualidade de vida das populações, uma vez que permite transportar pessoas e distribuir bens e matéria-prima [3]. No entanto, é um dos grandes responsáveis pela enorme dependência dos combustíveis fósseis, sendo que representa cerca de 50% do consumo final deste recurso natural não renovável (Figura 2).

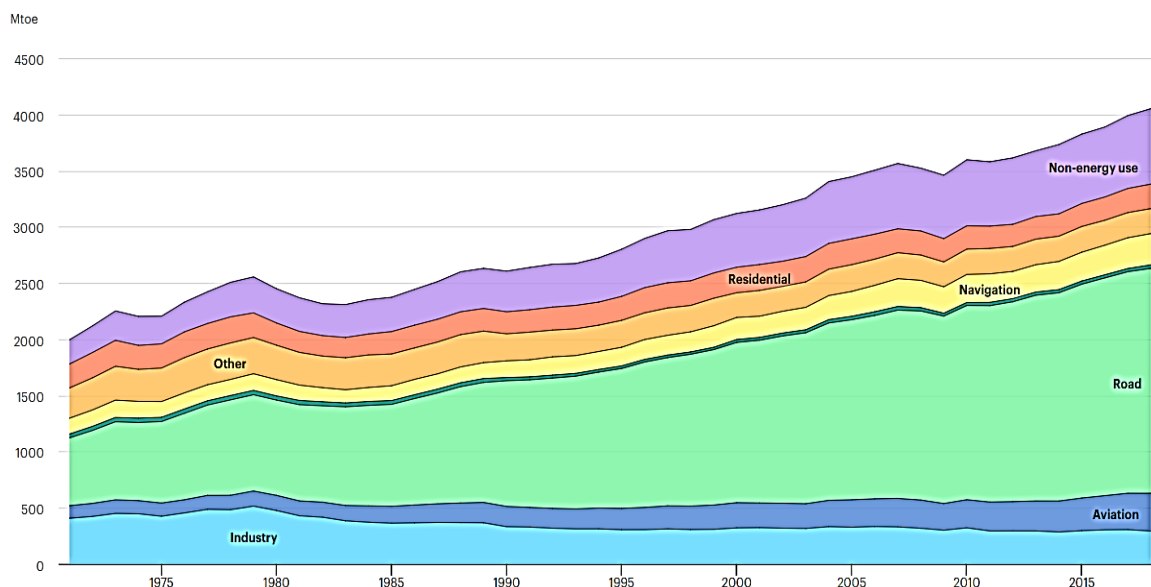
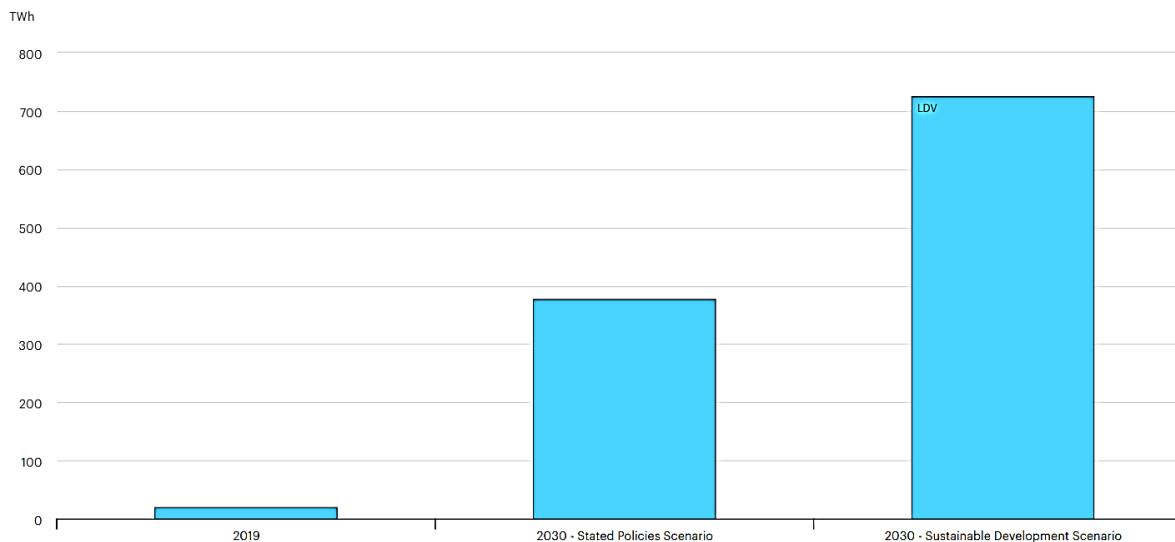


Figura 2 - Consumo de combustíveis fósseis por setor [1].

As consequências negativas da poluição causada pelos meios dos transportes levaram a comunidade científica, os governos e as empresas a estudar alternativas para uma mobilidade mais sustentável, inteligente e que satisfaça as necessidades dos utilizadores. Os veículos elétricos surgem assim como a principal alternativa aos veículos com motor a combustão e tem-se afirmado como uma das soluções mais eficazes [4]. Nos últimos anos, tem-se vindo a registar um incremento significativo da sua produção e comercialização, acompanhado também pelo desenvolvimento e implementação de estruturas para criar condições ao seu carregamento.

No entanto, os veículos elétricos apresentam alguns desafios que têm atrasado a sua comercialização massiva e que obrigaram os governos a recorrer a incentivos fiscais para aumentar o ritmo de crescimento da penetração no mercado. O processo de carregamento de um veículo elétrico é um dos obstáculos na aquisição por parte dos compradores. O tempo de carregamento é superior ao do abastecimento de um veículo tradicional e a sua autonomia, apesar de atualmente já quase equiparada aos modelos com motor a combustão, continua a ser um obstáculo para vários utilizadores. Além disso, esta mudança de paradigma cria a necessidade de instalar postos de carregamento e que, numa mobilidade elétrica de larga escala levará a uma sobrecarga da rede elétrica [5]. No gráfico apresentado na Figura 3, é apresentado o crescimento da procura de eletricidade para carregamento de carros elétricos em 2030, exigindo-se uma adaptação de infraestruturas e uma evolução das tecnologias de carregamento de veículos elétricos.



*Figura 3 - Demanda de eletricidade da frota de veículos 2019 e 2030 [6].*

Um ponto crucial na abordagem deste problema é o facto de que a maioria do tempo útil de vida de um automóvel está estacionado [7], sendo esta a melhor oportunidade para carregar os veículos. Hoje em dia, a maioria dos utilizadores de veículos elétricos efetua o carregamento nas suas habitações [8]. Contudo, quando estes se assumirem como dominantes no mercado dos automóveis, será necessário criar uma rede de carregadores com fácil acesso para todos. Cerca de 50% da população não tem condições para estacionar os veículos em locais com acesso a eletricidade, de forma a efetuar o carregamento [9]. Assim, os parques de estacionamento assumem um papel fundamental e essencial [10]. Para tal, é necessário implementar postos de carregamento nos parques de estacionamento em superfícies comerciais, nas escolas, nos edifícios empresariais, em zonas residenciais para que o utilizador tenha fácil acesso a um posto de carregamento [11].

Devido às infraestruturas que suportam os parques de estacionamento não estarem adaptadas, a rede dimensionada nestes não está preparada para suportar a potência associada a cada carregador. Sendo que renovar os circuitos e aumentar a capacidade dos parques, não é uma solução viável por si só, tendo que se conjugar com outras ferramentas [11]. Uma possibilidade de mitigar este problema é adoção de ferramentas que controlem o tempo de carregamento e a potência fornecida a cada veículo, permitindo controlar os picos de procura de energia, satisfazer as necessidades de cada utilizador e minimizar os custos económicos.

## **1.2. Contribuições**

Esta dissertação de mestrado contribui para a literatura e para a criação de condições que facilitem o uso de veículos elétricos, na medida que propõe a integração da gestão logística dos parques de estacionamento com a gestão de carregamento de veículos estacionados no mesmo. Desta forma, o estudo apresenta um sistema de gestão hierárquico composto por dois níveis de otimização. Mais concretamente, este trabalho de mestrado contribui:

- Na formulação matemática de uma metodologia para a otimização “Dia seguinte” do carregamento de veículos elétricos e estacionamento dos mesmos, tendo uma previsão da duração do estacionamento e das necessidades energéticas dos utilizadores para a próxima viagem. O objetivo deste controlador maximizar a satisfação dos utilizadores veículos elétricos;
- Na implementação de um método dinâmico de otimização do carregamento para veículos elétricos durante o período em que estes estão estacionados, escolhendo o lugar que o veículo elétrico deve estacionar. Este método é executado sempre que um veículo entra no parque. O objetivo deste método designado por “Duração da Estadia” é idêntico ao método anterior, mas considerando restrições adicionais que podem existir em parques reais.
- Na apresentação de um método de otimização de tempo real do uso de energia em cada uma das estações de carregamento instaladas no parque de estacionamento.
- Implementou-se ainda uma ferramenta para a criação de perfis de utilizadores de parques de estacionamento, definindo-se comportamentos padrões em função da localização do parque de estacionamento, de forma a testar-se as diferentes metodologias em cenários realistas.

Todas as contribuições científicas mencionadas e o sistema final proposto foram dimensionados em colaboração com a empresa francesa *Électricité de France* (EDF).

### **1.3. Estrutura da Tese**

Esta dissertação de mestrado é composta por seis capítulos, sendo que no presente capítulo apresenta a motivação por detrás deste estudo e as contribuições científicas do mesmo. O Capítulo 2 contém o estado de arte onde é apresentado o paradigma atual dos veículos elétricos e do seu mercado, as baterias utilizadas e o tipo de carregamentos implementados. Neste capítulo são igualmente descritos os parques de estacionamento e métodos para integração dos veículos elétricos nos mesmos.

O Capítulo 3 engloba as várias metodologias propostas. Para o primeiro nível de otimização é descrito detalhadamente dois métodos propostos: “Dia Seguinte” e “Duração da Estadia”. Por sua vez, para o segundo nível de otimização é apresentado um único método. O Capítulo 4 descreve a ferramenta utilizada para criar cenários de parques de estacionamento e perfis de utilizadores realistas para testar as metodologias propostas.

O Capítulo 5 apresenta casos de estudos para as diferentes metodologias propostas e para os diferentes cenários criados. Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões mais relevantes do estudo e os trabalhos futuros a desenvolver na continuação desta tese.

## 2. Estado da Arte

De forma a desenvolver a presente dissertação revelou-se necessário realizar uma pesquisa sobre veículos elétricos e o seu desenvolvimento, infraestruturas e ferramentas para o seu carregamento, e metodologias de gestão de parques de estacionamento para a integração de veículos elétricos.

### 2.1. Paradigma Atual dos Veículos Elétricos

O aparecimento do primeiro veículo elétrico remonta ainda para Século XIX. Contudo, devido ao baixo custo de derivados de petróleo e a uma tecnologia de baterias menos desenvolvida, o motor a combustão ultrapassou o motor elétrico e o motor a vapor, acabando por dominar o sector dos transportes durante mais de 100 anos [12].

Já no início desta década, os veículos elétricos começaram a figurar outra vez como uma alternativa viável ao tradicional motor de combustão. Este ressurgimento deve-se aos avanços tecnológicos e à maior preocupação com o impacto ambiental das atividades humanas. Sabe-se que os veículos elétricos contribuem com vários benefícios económicos e ambientais, incluindo redução da poluição sonora e atmosférica [13].

Define-se veículo elétrico (*EV*<sup>1</sup>) para os automóveis que utilizam pelo menos um motor elétrico no acionamento do veículo. Sendo que atualmente existem diferentes tipos de carros elétricos dependendo das suas fontes de energia: Veículo Elétrico a Bateria (*BEV*), Veículo Elétrico Híbrido Plug-in (*PHEV*) e Veículo a Célula de Combustível (*FCEV*):

- **BEV:** veículo que o sistema de propulsão é exclusivamente elétrico, alimentado por um conjunto de baterias, que podem ser carregadas com ligação à rede ou através da travagem regenerativa. As baterias de lítio são as mais predominantes no mercado dos automóveis [14] Em Portugal, no ano de 2020 o modelo *BEV* mais vendido foi o Nissan Leaf com 14% das vendas.
- **PHEV:** veículo em que o sistema de propulsão é constituído por um motor de combustão, que consome gásóleo ou gasolina, e um motor elétrico ligado a uma bateria. O condutor pode carregar o veículo através de postos de carregamento, tecnologia Plug-in. Além disso, as baterias também são alimentadas pelo motor de combustão e por um sistema de travagem regenerativa. No ano de 2020, o *PHEV* mais vendido em Portugal foi o BMW 530 com 7% das vendas.
- **FCEV:** veículo que utiliza um motor elétrico alimentado por uma *Fuel Cell*, geralmente fornecido por hidrogénio. Estes veículos funcionam com base na reação entre o oxigénio e o hidrogénio, produzindo a energia necessária para mover o veículo. O modelo mais conhecido é o Toyota Mirai [15].

---

<sup>1</sup> Utiliza-se, por vezes, a abreviatura anglo-saxónica *EV*, para se referir aos veículos elétricos.

Nos últimos anos, a produção e a venda de veículos elétricos têm vindo a aumentar de forma consistente, como é notório no gráfico apresentado na Figura 4. Sendo que na Noruega, em 2019, já se registou que a maioria dos veículos vendidos foram veículos elétricos, reforçando assim a ideia que o mercado dos veículos elétricos continuará em crescimento [16].

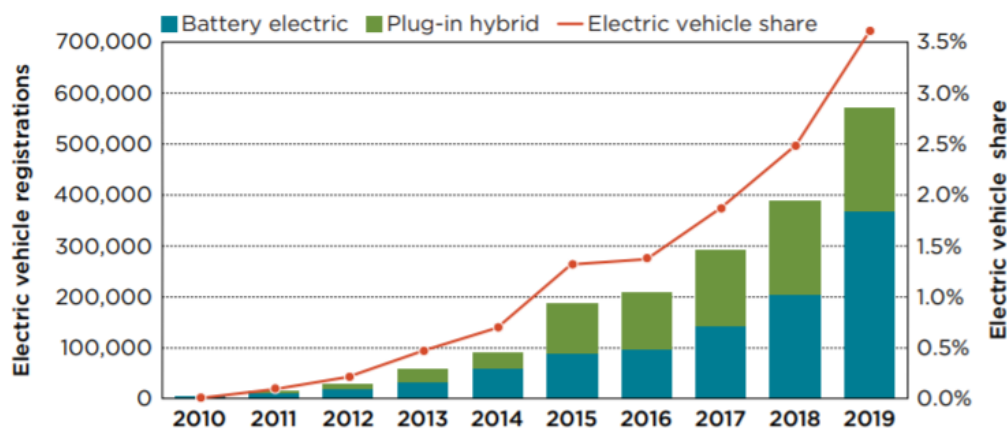


Figura 4 - Vendas de Veículos Elétricos nos países membros da EU e EFTA [17].

## 2.2. Baterias de Veículos Elétricos

As baterias mais utilizadas nos veículos elétricos comercializados são as baterias de iões de lítio. Apesar dos custos elevados dos iões de lítio [18], as características técnicas destas baterias revelam-se as mais vantajosas comparativamente com as baterias de chumbo e baterias de Níquel [19], como se pode observar na Tabela 1. Para a análise das baterias, considera-se os seguintes parâmetros:

- **Ciclo de vida:** número de descarga-recarga completas que a bateria pode realizar sem perder capacidade no seu desempenho.
- **Densidade de Energia:** é a relação entre a quantidade de energia armazenada por volume. Quanto maior este parâmetro, menos volume a bateria ocupa para armazenar o mesmo valor de energia.
- **Eficiência:** Percentagem da energia injetada durante o carregamento que a bateria consegue fornecer.
- **Estado da carga (SOC<sup>2</sup>):** é o estado de carga da bateria, geralmente expresso em percentagem da capacidade máxima da mesma.
- **Profundidade de descarga (DOD<sup>3</sup>):** É a percentagem da capacidade da bateria que foi descarregada. Esta percentagem é expressa em relação à capacidade máxima da bateria.
- **Taxa C:** baterias, a corrente de descarga é muitas vezes expressa como uma taxa C, a fim de normalizar a capacidade da bateria. Uma taxa de 1C significa que a corrente descarrega totalmente a bateria em 1 hora. Quanto maior o valor da taxa C, mais rápida a bateria fornece toda a sua energia e mais rápida recupera toda a sua capacidade.

<sup>2</sup> SOC – *State of Charge*

<sup>3</sup> DOD – *Depth of Discharge*

|                                       | <b>Íões de Lítio</b> | <b>Níquel</b> | <b>Chumbo</b> |
|---------------------------------------|----------------------|---------------|---------------|
| <b>Densidade Energética (Wh/kg)</b>   | 100 - 300            | 40-120        | 30-40         |
| <b>Densidade de Potência (W/kg)</b>   | 1000-5000            | 300-1000      | 500-800       |
| <b>Ciclo de Vida</b>                  | 500-1500             | 500-1000      | 500-800       |
| <b>Eficiência de carga e descarga</b> | 95 -99%              | 65-80%        | 70-92%        |

*Tabela 1 - Comparação dos parâmetros das baterias mais utilizadas.*

Outro fator igualmente importante quando se aborda o controlo de carga e descarga é o facto destas baterias de íões de lítio não terem efeito de memória, facilitando assim o processo de descarga [20], o que significa que podem ser carregadas novamente sem terem sido descarregadas na totalidade. O efeito de memória é o fenómeno responsável pela perda de capacidade das baterias se estas forem carregadas parcialmente. Isto não ocorre nas baterias de íões de lítio, fazendo com que possam ser carregadas independentemente do nível de carga na bateria a que se encontram.

Em 2019, a empresa suíça *Innolith AG* anunciou uma bateria de íões de lítio com eletrólitos constituídos por uma substância inorgânica que é mais estável e menos inflamável. Segundo os testes efetuados pela mesma empresa, esta bateria atinge uma densidade energética de 1000 Wh/kg, o que iria permitir aumentar a autonomia dos veículos elétricos para cerca de 1000 km [21].

Outro indicador positivo que ajudará a penetração dos veículos elétricos é a diminuição do preço das baterias de íões de lítio, que irão permitir ter preços mais competitivos e diminuir o impacto económico da degradação das baterias [22].

### **2.3. Carregamento de veículos elétricos**

Nesta secção são descritas as várias infraestruturas de carregamento para os *BEVs* e os *PHEVs*. O crescimento dos veículos elétricos é acompanhado por um grande desenvolvimento na rede de carregadores, com fácil acesso aos utilizadores de forma a satisfazer as suas necessidades energéticas. Para se iniciar o processo de carregamento de um veículo elétrico é necessário conectá-lo à rede, através de um posto de carregamento ou de uma tomada doméstica. Após a conexão, ocorre uma transferência de energia elétrica entre a rede e a bateria do veículo, até que esta atinja a sua capacidade máxima ou que seja desconectado da rede.

Os veículos podem assim ser carregados através de corrente alternada (AC), monofásica ou trifásica, que neste caso passará por um retificador que se encontra dentro do veículo que converte a corrente da rede pública para corrente contínua. Em alternativa, os veículos elétricos podem ser carregados em corrente contínua (DC) que é conectada à bateria por um cabo, sendo a corrente regulada no posto de carregamento. Na Tabela 2, é comparado a corrente máxima e a potência máxima de carregamento da corrente alternada e da corrente contínua.

| Tensão                                 | Corrente Alternada |                  | Corrente Contínua |
|--|--------------------|------------------|-------------------|
|  | AC (1-phase)       | AC (1–3-phase)   | DC                |
| <b>Corrente Máxima</b>                 | 10 A               | 13 A (1-phase)   | Até 700 A         |
|  |                    | 16 A (1-phase)   |                   |
|  |                    | 16 A (2-phase)   |                   |
|  |                    | 32 A (3-phase)   |                   |
| <b>Potência de Carregamento Máxima</b> | 2,3 kW             | 3 kW (1-phase)   | 350 kW            |
|  |                    | 3,7 kW (1-phase) |                   |
|  |                    | 7,2 kW (2-phase) |                   |
|  |                    | 22 kW (3-phase)  |                   |

*Tabela 2 - Tabela comparativa da Corrente Máxima, Potência de Carregamento Máxima de Corrente [23].*

O processo de carregamento poderá ser considerado lento, se o tempo de duração for entre 6 e 8 horas, semi-rápido se demorar entre 1 e 2 horas a proceder ao carregamento e rápido se apenas precisar de 30 minutos para efetuar o carregamento. A norma internacional IEC 61851 [24] define os padrões para quatro modos de tipo de sistema carregamento possíveis, sendo que na Tabela 3, está resumido as principais características dos modos de carregamento:

- **Modo 1:** este modo utiliza uma tomada doméstica ou industrial, carregamento lento AC, sendo que nas tomadas domésticas utiliza até 10 A e nas tomadas industriais até 16 A. É utilizado para carregar veículos de pequenas dimensões como bicicletas e motos elétricas.
- **Modo 2:** é um sistema de carregamento que permite que os veículos dimensionados para carregar só no modo 3, tenham possibilidade de carregar numa tomada doméstica ou industrial. Este modo de carregamento pode atingir uma corrente máxima de 32 A.
- **Modo 3:** é o sistema de fornecimento de energia em corrente alternada dimensionado especificamente para veículos elétricos, com o objetivo de aumentar a segurança no carregamento. Neste sistema existe comunicação entre o posto de carregamento e o *EV*.
  - **Tipo 1 – Yazaki:** Utilizado maioritariamente em veículos japoneses e americanos, é um sistema de ficha monofásica dimensionado para correntes de 32 A e tensões de 250 V. Esta tomada é composta por cinco pinos: fase, neutro, terra, controlo de inserção do conector e piloto de controlo (Figura 5 – (a)).
  - **Tipo 2 – Mennekes:** ficha monofásica e trifásica, habilitada a trabalhar com potências de 3 kW para ligações monofásicas e potência de 43 kW para conexões trifásicas. Este tipo de ficha é preferencialmente utilizado na Europa (Figura 5 – (b)).
  - **Tipo 3 – Scame:** idêntica ao tipo 2, razão pela qual é maioritariamente preterida a favor da mesma. Sistema de tomada trifásica (Figura 5 – (c)).



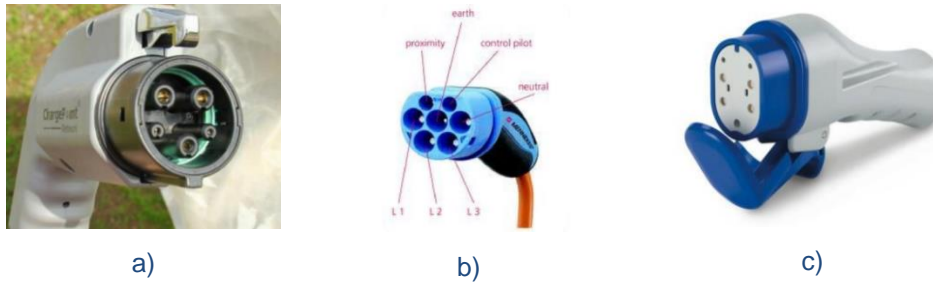


Figura 5 - Diferentes tipos de fichas a) Yazaki b) Mennekes c) Scama.

- **Modo 4:** é o sistema de carregamento rápido DC, que tem uma duração entre os 20 e 30 minutos para atingir um SOC de 80%, fornecendo ao veículo uma potência de 62,5 kW. Este tipo de carregador está normalizado pela IEC 61000 CHAdeMO e está a ser adotada por vários fabricantes: a *Tesla Motors* implementou um supercarregador que permite fornecer 50% do SOC em 15 minutos [25].

|                             | Modo 1                  | Modo 2                  | Modo 3                  | Modo 4 |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------|
| <b>Tipo de Carregamento</b> | Lento                   | Normal                  | Semi-Rápido             | Rápido |
| <b>Corrente Máxima</b>      | 16 A                    | 32 A                    | 250 A                   | 400 A  |
| <b>Sistema</b>              | Monofásico ou Trifásico | Monofásico ou Trifásico | Monofásico ou Trifásico | DC     |

Tabela 3 - Modos de sistema de carregamento segundo a Comissão Internacional de Eletromecânica.

Em alternativa, tem-se vindo a desenvolver sistemas de carregamento por indução, sem a necessidade de conectar o veículo à rede por meio de um cabo, permitindo que o carregamento seja feito em andamento. Estes sistemas atingem uma potência de 20 kW e o melhor registo de eficiência encontra-se nos 90% [26].

Pode-se assim classificar o tipo de sistemas de carregamentos de veículos elétricos nos seguintes parâmetros:

- Tipos de potência: AC ou DC;
- Direção do fluxo: unidirecional e bidirecional, permite descarregar os veículos para a rede;
- Tipos de ligação: acoplamento condutivo ou ligação sem fios;

## 2.4. Parque de estacionamento

Nas grandes zonas urbanas verifica-se uma extrema importância em garantir acesso a estacionamento que satisfaça as necessidades do utilizador e que controle o tráfego da cidade. Os critérios de satisfação do utilizador consistem na localização do parque, na sua dimensão e nas taxas da sua utilização [27].

O tipo de estacionamento poderá ser classificado com base na duração do estacionamento: curta duração, maioritariamente perto de superfícies comerciais, com rotatividade entre os utilizadores e menos de 3h de duração do estacionamento; média duração, entre 3 horas e 12 horas de duração de estacionamento; longa duração, como parques de estacionamento utilizados como interfaces de transportes (centrais de camionagem, aeroportos, estações de comboios) em que a estadia supera as 12h de duração. Ainda existe a classificação de parques pendulares, que são parques que a direção do fluxo é unidirecional, ou seja, os veículos chegam todos à mesma hora e saem no mesmo período [28].

Como já referido, os parques de estacionamento assumem um papel preponderante no carregamento de veículos elétricos. De facto, os carros passam cerca de 95% do seu tempo de vida estacionados [29], sendo esta a melhor oportunidade para efetuar o carregamento.

Estudos demonstram que a integração de veículos elétricos irá aumentar a procura de energia nos parques de estacionamento, reforçando a necessidade de criar estratégias para aumentar a eficiência energética nestes locais [30]. Desta forma, a gestão de parques de estacionamento tanto na perspetiva logística como energética tem vindo a ser estudada, sendo que os seguintes conceitos estão a ser implementados: controladores da potência e da duração de carregamento dos veículos, integração de recursos renováveis e tecnologia *vehicle-to-grid*.

#### **2.4.1. Algoritmos de controlo de carregamento de veículos elétricos**

Atualmente, estuda-se vários tipos de estratégias para integrar os veículos elétricos na rede de forma a minimizar os impactos negativos. Existem três tipos de sistemas de controlo de carregamento de veículos elétricos: não controlável, carregamento atrasado e controlo inteligente.

No paradigma de adoção de veículos elétricos a uma larga escala, sabe-se que um sistema não controlável de carregamento provocará diversos problemas na rede como a congestão da rede, ao pico de procura de energia [31]. Um sistema não controlável significa que o veículo começa a carregar assim que é conectado à tomada e o seu processo de carregamento é finalizado quando atinge a capacidade máxima da bateria ou é desconectado da rede. Estes sistemas requerem uma capacidade energética superior aos sistemas com controlo inteligente [32].

O sistema de carregamento atrasado, por sua vez, usa o preço da eletricidade de forma a influenciar os utilizadores, criando assim benefícios tanto para a rede como para o processo de carregamento. Com uma estrutura de tarifas apropriada é possível “controlar” os períodos que os veículos estão a ser carregados, uma vez que a grande maioria dos utilizadores irá optar pelos períodos em que a taxa é mais reduzida. Esta estratégia reduz o impacto que os veículos elétricos têm na rede em períodos que esta está a ser sobrecarregada por outros aparelhos, contudo não otimizam a capacidade da mesma e os veículos irão começar todos a carregar no período em que a tarifa se altera, provocando um pico de procura significativo na rede.

Vários estudos apontam que as soluções passaram por um sistema que controla o processo de carregamento (hora e potência) de cada *EV*. Existem na literatura várias metodologias propostas utilizadas: controlador difuso, controlador centralizado e controlador descentralizado.

O controlo difuso, proposto por Lofti Zadeh [33], consiste num mapeamento não linear entre as variáveis de entrada e de saída, que utiliza um modelo não matemático, baseado em regras expressas em linguagem natural. Os autores [34] propõem um modelo de controlo difuso para ajustar o carregamento e descarregamento de veículos, com o objetivo de satisfazer o utilizador. Desta forma, testaram este algoritmo para diferentes casos, sendo que se verificou uma diminuição da sobrecarga na rede e um aumento do número de carros carregados com sucesso comparando com um sistema não controlável. A limitação deste estudo encontra-se no facto do algoritmo não considerar as necessidades energéticas dos utilizadores para a próxima viagem.

Por sua vez o controlo centralizado encontra a solução global ótima [35] e apresenta a melhor performance na otimização de frotas de veículos [36], contudo, à medida que o número de *EVs* aumenta, a dimensão do problema de otimização também aumenta, fazendo com que este tipo de controlo tenha um elevado custo computacional. Desta forma, uma das soluções é recorrer a controlo em hierarquia, onde o controlador principal aloca a energia a um grupo e, por sua vez, esse grupo tem outro controlador que gere a energia alocada.

Por último, o controlo descentralizado é um sistema constituído por mais que um agente, que atuam em diferentes grupos do sistema geral. A fiabilidade deste tipo de controlo decresce com o aumento da complexidade do problema de otimização. Em E. Xydas, é proposto um algoritmo descentralizado para programar o carregamento de veículos, onde a decisão de carregamento pertence ao *EV*. Baseado numa arquitetura multi-agente, cada entidade age como um sistema autónomo e tenta alcançar os seus próprios objetivos[37]. O primeiro agente deste sistema tem como objetivo maximizar o lucro do agregador através da conceção da política de preços apropriada de acordo com previsões precisas da procura de energia e da geração. O agregador é um intermediário entre o operador da rede e um grupo de consumidores de eletricidade, neste caso os utilizadores de veículos elétricos. E um segundo agente que classifica os *EVs* como responsáveis, que programam o seu carregamento de forma racional, e como irresponsáveis, que carregam o seu veículo independentemente do preço da eletricidade. Uma das limitações desta abordagem é o facto de utilizar previsões, estando assim dependente da precisão das mesmas.

Outro ponto que as estratégias de carregamento divergem é na implementação da função objetivo. Cada controlo poderá ter um ou mais objetivos dependendo do ponto de vista para que foram dimensionados: utilizador do *EV*, agregador ou da rede. Assim, os objetivos poderão passar por maximizar a satisfação do dono do veículo [34], maximizar o número de veículos carregados[38], maximizar as vendas do parque de estacionamento [38], minimizar o pico de procura de eletricidade na rede.

Os algoritmos estudados também se diferenciam pela linha temporal utilizada para a tomada de decisão. Sendo que existem abordagens que tomam decisões para tempo-real [39] , outras, por sua

vez, para o dia-seguinte [40]. Existem ainda abordagens que utilizam um modelo híbrido, em que executam o escalonamento para o dia-seguinte e fazem correções em tempo-real [38].

Por último, existem ainda metodologias que preveem a integração de fontes de energias renováveis ou ainda de sistema de armazenamento de energia. Como demonstra o autor Yao L., este tipo de sistemas não só maximiza a satisfação dos proprietários dos EVs, mas também minimiza o custo operacional, dando prioridade à utilização da energia proveniente das fontes renováveis ou do sistema de armazenamento de baterias [39].

### 2.4.2. Integração de Recurso Renováveis

Os recursos renováveis assumem cada vez mais preponderância na geração de energia, sendo que em Portugal, segundo a Associação de Energias Renováveis (APREN) e como se pode observar no gráfico da Figura 6, nos primeiros oito meses de 2021 foram gerados cerca de 21 737 GWh de eletricidade com origem renovável, aproximadamente 69% da eletricidade total gerada.

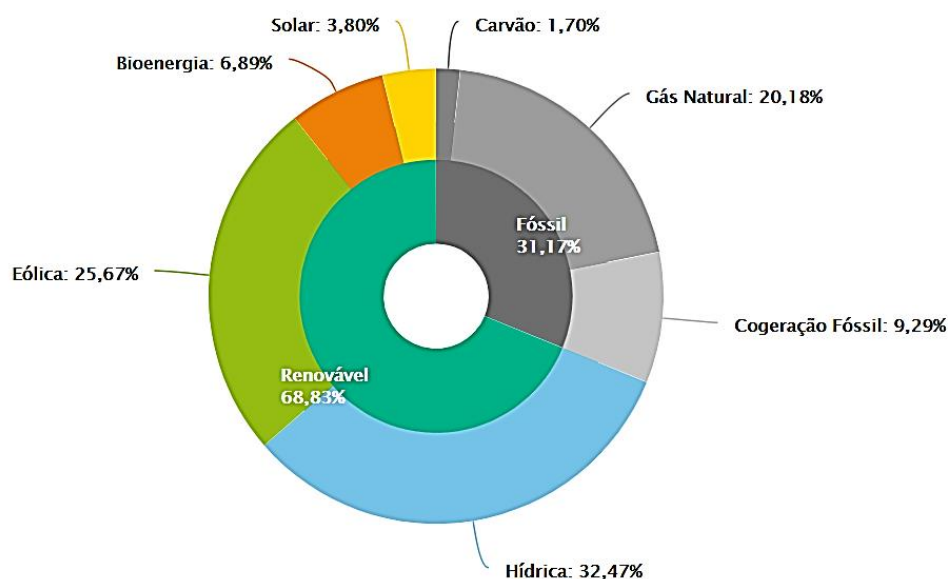


Figura 6 - Balanço da Produção de Eletricidade de Portugal Continental - janeiro a agosto de 2021[41].

A utilização de energias renováveis é uma das soluções para mitigar o aumento da procura energética previsto com a integração dos veículos em parques de estacionamento. As fontes renováveis com maior expressão na produção de eletricidade em Portugal, a hídrica e a eólica, trata-se maioritariamente de instalações de elevadas potências (MW) e necessitam de ter condições bastantes específicas para a sua instalação (ex. zona com vento). Desta forma, os painéis fotovoltaicos apresentam-se como alternativa, uma vez que a sua instalação poderá ocorrer localmente nos parques de estacionamento.

Dependendo dos perfis do parque, esta solução poderá ser determinante, uma vez que os carros passam a grande maioria do dia estacionados (ex. parques de estacionamento de empresas), período do dia com maior incidência solar e com menor procura de energia por parte de outros setores [42].

Em Portugal, já existem várias superfícies comerciais que utilizam as coberturas dos parques de estacionamento para a integração de painéis solares, para se tornarem mais sustentáveis. Um estudo efetuado num parque de estacionamento situado em Almada [43], demonstra que uma correlação adequada entre o número de veículos e a geração de eletricidade por painéis solares funciona em mais de metade do ano e que economicamente é uma solução viável.

### 2.4.3. Tecnologia vehicle-to-grid

A tecnologia *vehicle-to-grid* (Figura 7) permite utilizar a energia armazenada nas baterias dos veículos para fornecer energia à rede. Neste caso, a conexão entre o veículo e a rede é bidirecional. Desta forma, em períodos de maior procura, a energia armazenada num veículo poderá ser utilizada de modo a não sobrecarregar a rede, e mais tarde, num período posterior e com menos restrições na operação da rede, esta energia é carregada novamente nas baterias. Nestes casos, o utilizador do *EV* que foi descarregado, será recompensado também financeiramente, uma vez que prestou um serviço ao parque de estacionamento durante o seu estacionamento.

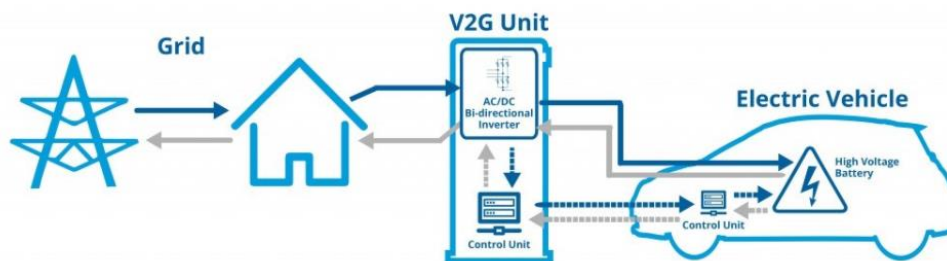


Figura 7 - Esquemático da estrutura da tecnologia vehicle-to-grid.

Esta tecnologia também permite ainda regular a potência ativa, suportar a potência reativa, balancear os vales do diagrama de carga e rastreamento de recursos renováveis [44].

A implementação desta tecnologia não poderá esquecer o principal objetivo de um veículo: garantir a mobilidade do utilizador. Por isso, um caso em que a bateria esteja totalmente descarregada quando o utilizador quiser se deslocar não é tolerado. Desta forma, a integração do *vehicle-to-grid* terá de ser agilizada com a integração de um sistema de controlo de carregamento de forma a balancear a carga de cada veículo [45].

A grande desvantagem e cujo impacto ainda está a ser estudado, é o aumento da degradação das baterias associadas a esta tecnologia. Contudo, como demonstra o autor *Samveg Saxena*, se a tecnologia *vehicle-to-grid* for utilizada ocasionalmente e em casos de emergência, que será o cenário mais realista, o impacto na degradação da bateria é reduzido. O autor concluiu que, se o *EV* fornecer energia 20 vezes por ano, as perdas de capacidade média de 10 anos serão somente de 0,38% [46].

## 2.5. Considerações gerais sobre o estado da arte

Na revisão da literatura apresentada nesta dissertação foi descrito o paradigma no que diz respeito ao mercado dos veículos elétricos e aos diferentes tipos de carregamentos padronizados. Além disso, foi

igualmente descrito o impacto que o aumento da comercialização de veículos elétricos provocará na procura de eletricidade e identificaram-se ferramentas que estão a ser implementadas para minimizar o referido impacto[30].

No estudo das ferramentas, foi descrito as integrações de recursos renováveis [43] e da tecnologia *vehicle-to-grid* [44] nos parques de estacionamento. Adicionalmente foram explicados os diferentes algoritmos de controlo existentes, sendo que na literatura são propostos três tipos de controlo e diversos objetivos. Os algoritmos estudados possuem limitações como não considerarem as necessidades energéticas de cada utilizador e não terem otimizado a localização do veículo no parque de estacionamento. Concluiu-se ainda que as várias estratégias estudadas poderão ser implementadas em simultâneo.

No sistema de gestão proposto nesta dissertação de mestrado, pretende-se contribuir com metodologias que ultrapassem as limitações identificadas na literatura. Desta forma, utiliza-se um sistema de gestão hierárquico de forma a reduzir a complexidade computacional associada aos controladores centralizados. Além disso, o modelo proposto tem em consideração as necessidades energéticas dos utilizadores para as próximas viagens, sendo que o objetivo é maximizar a satisfação do utilizador.

Em relação à linha temporal implementada neste modelo, opta-se por um sistema híbrido com um primeiro nível de otimização a longo prazo e o segundo nível que funciona em tempo-real. No modelo proposto integra-se a tecnologia *vehicle-to-grid*. Outro aspeto diferenciador do modelo proposto é o fato de se considerar a localização do veículo no parque como uma variável, considerando-se que se o sistema poder escolher o lugar de estacionamento do veículo, poderá ser possível otimizar o uso de energia.

### 3. Metodologia

Este capítulo é dedicado à apresentação do sistema proposto e à descrição dos métodos adotados para o desenvolvimento de cada um dos níveis de otimização.

Este capítulo inicia-se com uma descrição da abordagem do problema e uma explicação detalhada da solução proposta. De seguida, é apresentada a fórmula matemática dos vários métodos propostos para aplicação da solução proposta. Na secção 3.2, detalha-se a implementação do primeiro nível de otimização. Neste nível, opta-se por apresentar duas metodologias: na secção 3.2.1, é apresentado a metodologia “Dia Seguinte”, em que se utiliza uma otimização para executar o planeamento de carregamento de um dia inteiro; e na secção 3.2.2 é demonstrado a segunda metodologia para o primeiro nível de otimização, “Duração da Estadia”. Neste caso, executa-se uma otimização sempre que um veículo entra do parque de estacionamento. De seguida, na secção 3.3 descreve-se a formulação do segundo nível de otimização. No esquema apresentado na Figura 8 , são resumidas as características e cada método proposto.

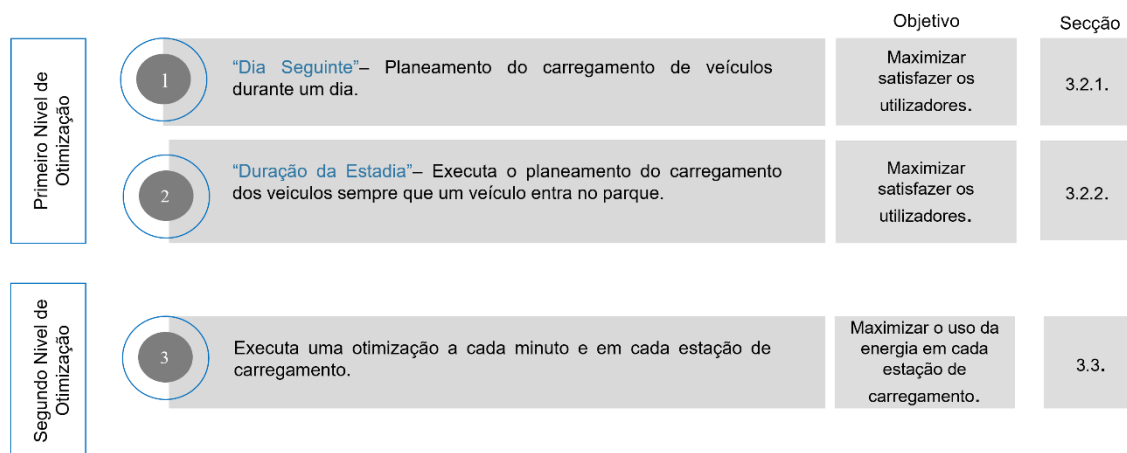


Figura 8 - Esquema Resumo da Metodologias Propostas.

#### 3.1. Introdução

Considera-se por definição que o parque de estacionamento é constituído por diversos lugares, sendo que cada lugar tem acesso a um terminal de carregamento. Esse terminal está ligado a uma estação de carregamento de veículos elétricos,  $CS^4$ . O número de terminais de cada estação de carregamento,  $N_{EVCS}$ , corresponde ao número de veículos que cada  $CS$  permite carregar em simultâneo. Além disso, sabe-se que o parque de estacionamento tem uma capacidade elétrica máxima,  $P_{ParkMax}$ , definida pelo proprietário, por contrato ou pelas limitações técnicas da infraestrutura.

No modelo proposto, é considerado que existe uma ferramenta de comunicação (ex. APP para telemóvel) entre o utilizador do  $EV$  e o sistema de gestão do parque, permitido ao primeiro informar o

<sup>4</sup> Utiliza-se o termo anglo-saxónico *Charging Station*, para se referir às estações de carregamento.

período em que chega ao parque, o estado da bateria quando entra no parque, o período que o veículo vai sair do parque e a energia com que pretende sair do parque. Com esta informação o sistema de gestão de energia determina:

- Se é necessário carregar a bateria do veículo;
- Se é possível, caso necessário, descarregar a bateria do veículo para carregar outro veículo ou para minimizar a procura da rede;
- Qual a estação de carregamento que o veículo deverá conectar para satisfazer as suas necessidades e para otimizar o uso de energia de todo o parque de estacionamento;
- Os períodos de tempo em que o veículo está a carregar de forma a sair do parque com a energia requerida.

Através da ferramenta de comunicação, o sistema de gestão informa o utilizador se consegue fornecer a energia requerida e o lugar que este deverá estacionar o seu veículo, com vista a satisfazer as suas necessidades energéticas.

Desta forma, o sistema de gestão será constituído por dois níveis hierárquicos de otimização (Figura 9). O modelo com dois níveis de otimização reduz a complexidade do processo, aumenta a sua modularidade, independência e redundância. Além disso, este sistema proporciona melhor monitorização do estado dos veículos elétricos, a fim de otimizar as transações energéticas e aumentar a eficiência global do sistema:

- **Primeiro nível de otimização – Operador Principal:** Este primeiro nível tem como objetivo satisfazer o máximo de utilizadores possível, sabendo as necessidades dos utilizadores e os períodos que estes saem do parque. O primeiro nível tem em consideração as necessidades energéticas de cada veículo, a duração do estacionamento e atribui-lhe as estações de carregamento e o escalonamento do seu carregamento.
- **Segundo nível de otimização – Operadores Locais:** este nível, por sua vez, está localizado em cada CS e executa o escalonamento de carregamento dos EVs que estão alocados a determinada CS. Com base no escalonamento executado pelo primeiro nível, o segundo nível otimiza o uso de energia para cada veículo. Se houver a possibilidade de usar mais energia do que a atribuída pelo primeiro nível, este pede permissão ao primeiro nível de forma a saber se não está a violar nenhum limite do parque ou do circuito e que poderá utilizar mais energia do que aquela atribuída inicialmente.



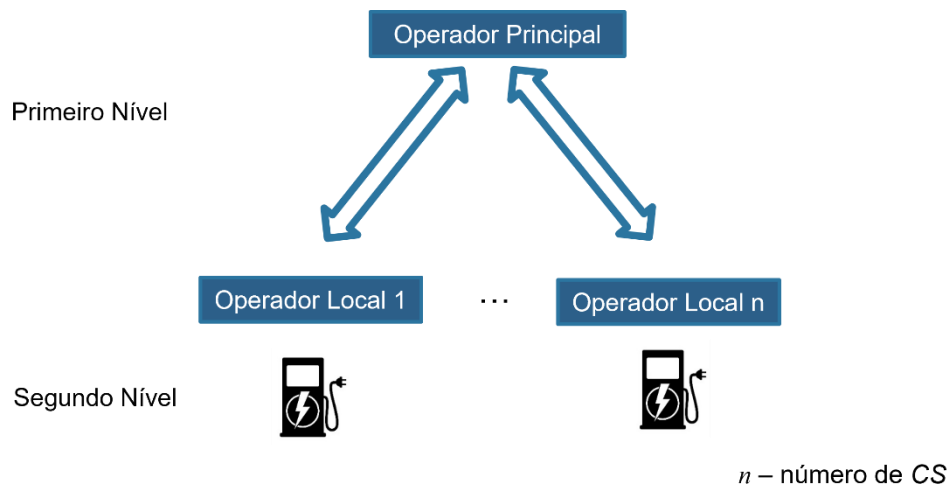


Figura 9 - Princípio Geral da Hierarquia de Níveis.

### 3.1.1. Softwares Utilizados

De forma a desenvolver e implementar o sistema pretendido foram utilizados diferentes softwares. Nesta secção descreve-se cada software e de que forma estão integrados na estrutura da simulação:

- **Python Script:** no ficheiro de Python desenvolve-se um modelo de caracterização de utilizadores de parques de estacionamento, consoante alguns parâmetros definidos: modelos dos VEs, período de entrada e saída do parque e energia pedida por cada utilizador. A descrição desta ferramenta encontra-se no capítulo 4.
- **EXCEL:** utiliza-se as folhas de cálculo de forma a organizar a informação necessária para executar a simulação. No EXCEL define-se os parâmetros da simulação, os parâmetros do parque de estacionamento, os dados de cada estação de carregamento e é o local onde são guardados os dados dos veículos elétricos provenientes do ficheiro de Python.
- **MATLAB:** O MATLAB é a base da simulação, sendo responsável por ler a informação do EXCEL, tratar e efetuar cálculos auxiliares, de forma a enviar a informação para o GAMS. Após a otimização, o MATLAB recebe os valores e trata todos os resultados da simulação.
- **GAMS:** O *General Algebraic Modeling System* é um sistema de modelagem para programação e otimização matemática. Nos ficheiros GAMS estão definidas todas as restrições, equações e limites das variáveis do problema. O GAMS adapta-se de forma perfeita a este estudo, uma vez que permite efetuar otimizações em função de uma variável de tempo.

O processo de simulação inicia-se com a execução do ficheiro de Python que caracteriza o comportamento de cada utilizador do parque. De seguida, esta informação relativa aos veículos elétricos é guardada num ficheiro de EXCEL, que incluirá igualmente dados relativos às estações de carregamento e ao parque de estacionamento. Posteriormente, executa-se o ficheiro de MATLAB que lê a informação proveniente do EXCEL. Sendo que quando um veículo entra no parque, o MATLAB chama o ficheiro de GAMS do primeiro nível de otimização que caracteriza o carregamento do VEs durante o período em que estarão estacionados. No ficheiro GAMS, estão definidas todas as equações

e as restrições relacionadas com as potências dos veículos, das estações de carregamento, dos circuitos e do parque de estacionamento. Em paralelo, o MATLAB chama o segundo nível de otimização a cada período de tempo, sendo que este nível irá otimizar o carregamento dos veículos naquele instante (Figura 10).

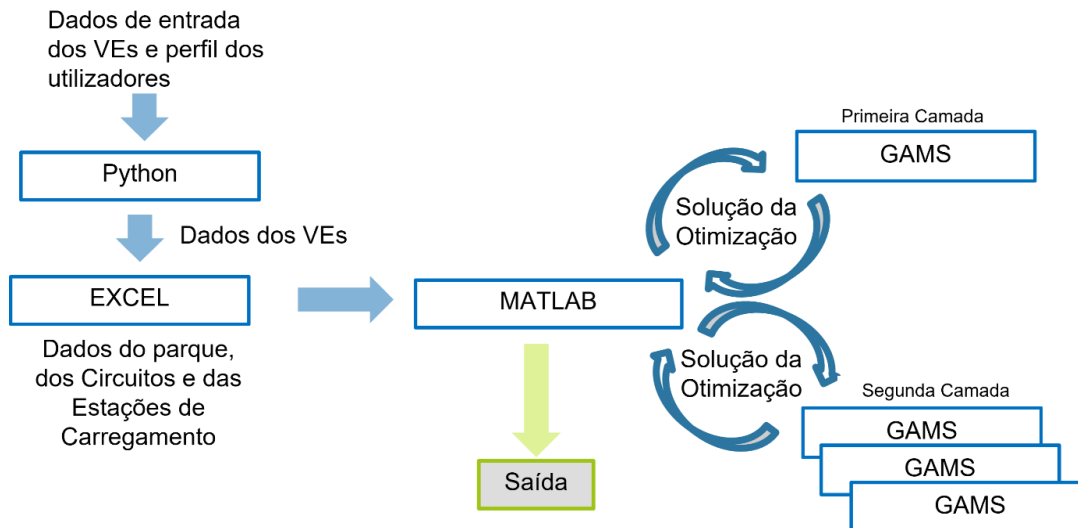


Figura 10 - Estrutura da conectividade entre softwares.

### 3.2. Primeiro Nível

Para o desenvolvimento do sistema de gestão de energia, inicia-se com a implementação do primeiro nível de otimização. Sendo que se testou dois algoritmos: “Dia seguinte” e “Duração da Estadia”, que serão descritos nas secções 3.2.1 e 3.2.2, respetivamente. Identifica-se de seguida os parâmetros associados a cada veículo, a cada CS e ao parque de estacionamento. Sabe-se que primeiro nível de otimização tem acesso aos seguintes parâmetros:

- **Informações gerais:** é definido a duração de cada período da otimização,  $T_{duration}$ , assim como a capacidade total do parque,  $P_{ParkMax}$ .
- **Estações de carregamento:** o sistema recebe os dados técnicos das estações de carregamento, nomeadamente: capacidade de carregamento,  $P_{CSmax(CS)}$ , eficiência do carregador,  $Eff_{CS(CS)}$ , e o número lugares de estacionamento correspondentes a cada estação de carregamento,  $N_{EVCS}$ .
- **Veículos:** o sistema tem acesso aos dados técnicos de todos os veículos que entram no parque: modelo, eficiência de carregamento,  $Eff_{Ch(Ev)}$ , e de descarregamento capacidade máxima da bateria, capacidade máxima de carregamento,  $P_{Chmax(Ev)}$ . Além disso, tem acesso ao estado da bateria inicial,  $SOC_{i(Ev)}$ , ao estado da bateria que o utilizador quer sair do parque,  $SOC_{req(Ev)}$ , e aos períodos de chegada e saída do parque,  $t_{i(Ev)}$  e  $t_{final(Ev)}$ .

Com base nestes dados, e tendo uma previsão dos acontecimentos futuros, o sistema consegue dar prioridade aos veículos com maior necessidade de carga, tendo em consideração a necessidade de

energia e o tempo que permanecem no parque com o objetivo final de satisfazer o maior número de utilizadores. Assim, para cada período este nível de otimização indica a energia fornecida a cada veículo.

### 3.2.1. Metodologia 1 – “Dia Seguinte”

A primeira metodologia proposta consiste numa otimização diária, em que o algoritmo considera todas as entradas e saídas de veículos ao longo do dia e as suas necessidades energéticas de forma a executar o perfil de carregamento de cada veículo.

Define-se que o parque de estacionamento tem capacidade máxima de lugares,  $N_{place}$ , estão instaladas no parque um número de estações de carregamento,  $N_{CS}$ , e que existe um número máximo de veículos a estacionarem,  $N_{Ev}$ . Adicionalmente, define-se que a simulação tem a duração de um dia e a duração de cada período,  $T_{duration}$ , que define o período máximo da simulação,  $T_S$ .

A estrutura e a conectividade entre os softwares são representadas no esquema da Figura 11, sendo que o MATLAB envia para o GAMS todos os dados do parque de estacionamento, das estações de carregamento e do EVs que irão entrar no parque durante um próximo dia.

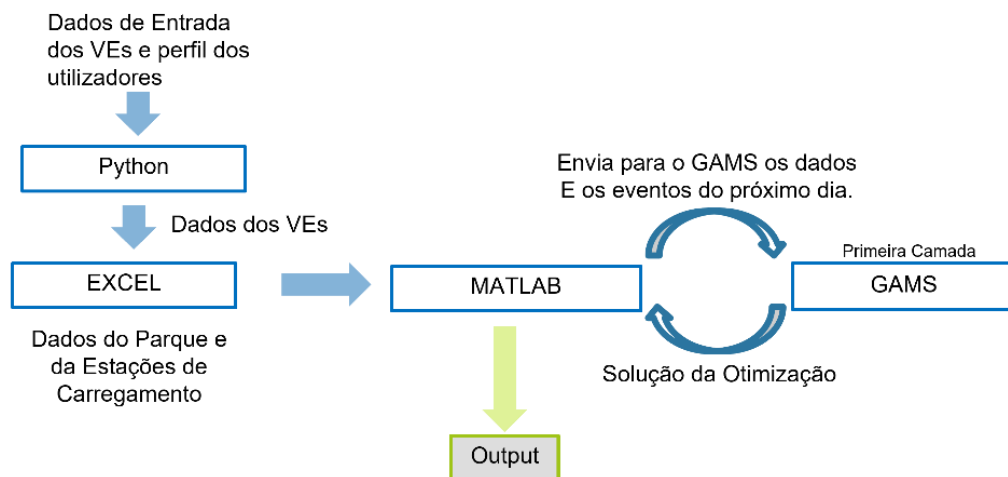


Figura 11 - Estrutura da conectividade entre os softwares - Versão "Dia Seguinte".

### 3.2.2. Função Objetivo

A função objetivo,  $F_{obj1}$ , da primeira metodologia proposta é a seguinte (equação 1.1):

$$F_{obj1} = \sum_{t=1}^{t_{final}(EV)} \left[ \sum_{Ev=1}^{numEv} \left( \alpha \times \left( SOC_{req}(Ev) - SOC_{Ev,t_{final}(Ev)} \right) + P_{Dch}(Ev,t) \right) - MinSoc_{(t)} \right] \quad (1.1)$$

Onde  $SOC_{req(EV)}$  é o valor da energia que o veículo  $Ev$  pretende sair do parque e o  $SOC_{(Ev,t_{final(EV)})}$  é a energia que o veículo  $Ev$  estará no período que sairá do parque,  $t_{final(EV)}$ . Desta forma, pretende-se minimizar a diferença entre o estado de carregamento das baterias requerido pelo utilizador e o estado de carregamento das bateria que efetivamente foi atingido no período em que o EV sai do parque. A satisfação do utilizador será máxima caso o EV atinja exatamente o valor requerido pelo utilizador, ( $SOC_{req(EV)} - SOC_{Ev,t_{final(EV)}} = 0$ ). Esta parcela é multiplicada pelo fator  $\alpha$  para aumentar o peso da mesma, uma vez que é o principal objetivo do algoritmo.

Adicionou-se igualmente um fator à função objetivo que representa o custo da descarga dos veículos. O objetivo passa por minimizar a potência ativa de descarga,  $P_{Dch(Ev,t)}$ , dos veículos ao longo do dia. Com isto, pretende-se que a utilização da energia armazenada das baterias dos veículos só seja utilizada nos períodos em que existem restrições no parque e há veículos que necessitam de ser carregados. Por último, o cada período pretende-se aumentar o nível do estado da bateria do veículo com menos carga (em percentagem) na bateria através da variável  $MinSoc(t)$  que guarda esse valor para cada instante  $t$ .

### 3.2.3. Restrições

Nesta seção, apresenta-se as restrições associadas à primeira metodologia proposta deste estudo (equações 1.2 a 1.13). A função objetivo apresentada na seção anterior está sujeita a restrições que garantem que o parque de estacionamento, as estações de carregamento e os veículos funcionem de forma correta.

Começa-se por identificar as restrições associadas ao parque de estacionamento. Sabe-se que as instalações dos parques de estacionamento estão limitadas por uma potência ativa máxima,  $P_{ParkMax}$ , que poderá ser de cariz técnico ou contratual. Assim, tem-se que as potências ativas consumidas pelas estações de carregamento não poderão exceder a capacidade limite do parque. O balanço entre a potência ativa de carregamento da estação de carregamento  $CS$  no instante  $t$ ,  $P_{CS_C(CS,t)}$ , e a potência ativa de descarregamento da estação de carregamento  $CS$  no instante  $t$ ,  $P_{CS_D(CS,t)}$ , considerando a eficiência das estações de carregamento,  $Eff_{CS(CS)}$ , terá de ser igual ou inferior ao limite da potência instalado no parque,  $P_{ParkMax}$ .

$$\sum_{CS=1}^{N_{CS}} \frac{P_{CS_C(CS,t)} - P_{CS_D(CS,t)}}{Eff_{CS(CS)}} \leq P_{ParkMax}, \forall t \in \{1, \dots, T_s\} \quad (1.2)$$

A estação de carregamento  $CS$  tem limites de potência ativa,  $P_{CSmax(CS)}$ . Desta forma, as potências ativas de carregamento e descarregamento não deverão ultrapassar este limite:

$$P_{CS_C(CS,t)} \leq P_{CSmax(CS)}; \forall CS \in \{1, \dots, N_{CS}\}; \forall t \in \{1, \dots, T_s\} \quad (1.5)$$

$$P_{CS_D(CS,t)} \leq P_{CSmax(CS)} \forall CS \in \{1, \dots, N_{CS}\}; \forall t \in \{1, \dots, T_s\} \quad (1.6)$$

$$P_{Ch(Ev,t)} \leq P_{Chmax(Ev,t)} \times X_{Ch(Ev,t)}; \forall Ev \in \{1, \dots, N_{Ev}\}; \forall t \in \{1, \dots, T_s\} \quad (1.7)$$

$$P_{Dch(Ev,t)} \leq P_{Dchmax(Ev,t)} \times X_{Dch(Ev,t)}; \forall Ev \in \{1, \dots, N_{Ev}\}; \forall t \in \{1, \dots, T_s\} \quad (1.8)$$

Introduziu-se duas variáveis binárias que comandam o estado de carregamento e descarregamento,  $X_{Ch(Ev,t)}$  e  $X_{Dch(Ev,t)}$ , dos veículos definem o estado de carregamento ou descarregamento de cada veículo  $Ev$  no instante  $t$ . Sabe-se que a soma destas duas variáveis não pode ser superior a 1, de forma a garantir que o veículo não carrega e descarrega em simultâneo:

$$X_{Ch(Ev,t)} + X_{Dch(Ev,t)} \leq 1, Ev \in \{1, \dots, N_{Ev}\}; \forall t \in \{1, \dots, T_s\} \quad (1.9)$$

As equações apresentadas de seguida, definem o balanço energético de cada veículo  $Ev$  no instante  $t$ . O fator  $FT$  representa a relação entre o período definido para a simulação,  $T_{Duration}$ , e uma hora, sendo utilizado para calcular a energia fornecida ou recebida pelos veículos em cada período. Tem-se assim que no final do primeiro período que o veículo  $Ev$  permanece no parque, o estado da sua bateria,  $SOC_{(Ev,t)}$ , é definido pela soma do estado da bateria quando o veículo  $Ev$  entra no parque,  $SOC_{i(Ev)}$ , com a energia recebida ou fornecida à rede durante esse período,  $(P_{Ch(Ev,t)} - P_{Dch(Ev,t)}) * FT$ .

$$SOC_{(Ev,t)} = SOC_{i(Ev)} + (P_{Ch(Ev,t)} - P_{Dch(Ev,t)}) \times FT \quad (1.10)$$

$$\forall Ev \in \{1, \dots, N_{Ev}\}; \forall t = t_{i(Ev)}$$

Durante os restantes períodos em que o veículo permanece estacionado, o estado da sua bateria no instante  $t$ ,  $SOC_{(Ev,t)}$ , é definido pela soma do estado da bateria no instante anterior,  $SOC_{(Ev,t-1)}$ , com a energia recebida ou fornecida à rede durante esse período.

$$SOC_{(Ev,t)} = SOC_{(Ev,t-1)} + (P_{Ch(Ev,t)} - P_{Dch(Ev,t)}) \times FT \quad (1.11)$$

$$\forall Ev \in \{1, \dots, N_{Ev}\}; \forall t \in \{t_{i(Ev)} + 1, \dots, T_s\}$$

Por último, nos períodos em que o veículo  $Ev$  sai do parque de estacionamento o estado da sua bateria é associada como nulo.

$$SOC_{(Ev,t)} = 0; \forall Ev \in \{1, \dots, N_{Ev}\}; \forall t \notin \{t_{i(Ev)} + 1, \dots, T_s\} \quad (1.12)$$

Ainda é limitado os valores do estado da bateria em cada instante  $t$  de forma a não ultrapassarem a capacidade máxima da bateria,  $MaxCap_{(Ev)}$ . Além disso, também foi definido um limite mínimo que a bateria do  $Ev$ ,  $MinSOC_{(Ev,t)}$ .

$$\text{MinSOC}_{(Ev)} \leq \text{SOC}_{(Ev,t)} \leq \text{MaxCap}_{(Ev)} ; \forall Ev \in \{1, \dots, N_{Ev}\}; \forall t \in \{1, \dots, T_s\} \quad (1.13)$$

### 3.2.1. Metodologia 2 - “Duração do Estacionamento”

A segunda metodologia proposta nesta dissertação, intitula-se como “Duração do Estacionamento”. Neste caso, o algoritmo executa a otimização sempre que um veículo entra no parque de estacionamento, sendo que o período dessa otimização corresponde ao instante  $t_i$  em que o veículo entra do parque até ao instante que o veículo que permanece estacionado até mais tarde sai do parque,  $t_{LastEV}$ . Outro aspeto importante a realçar é o fato desta otimização ter que estacionar somente um veículo, sendo que o vai alocar a uma estação de carregamento  $CS$  e só em pós-processamento é que se atribui um lugar de estacionamento que esteja conectado com a determinada  $CS$ .

Assim, classifica-se os veículos em duas categorias no instante  $t$ :

- **Veículo a estacionar:** o veículo  $Ev$  que chega ao parque no instante  $t$ , sairá do parque de estacionamento no instante  $t_{final(Ev)}$ , com um estado de bateria de  $\text{SOC}_{i(Ev)}$  e requer que parta do parque de estacionamento com o estado de bateria de  $\text{SOC}_{req(Ev)}$ . O algoritmo é responsável por alocar este veículo  $Ev$  a uma estação de carregamento  $CS$  durante o período do seu estacionamento definido pela variável binária  $X_{CS(CS)}$ , e por executar a gestão do carregamento do veículo de forma a garantir que este sai do parque com a energia requerida.
- **Veículos estacionados:** o veículo  $Eve$  já se encontra estacionado no instante  $t$  na estação de carregamento que lhe foi atribuída quando entrou no parque- Esta informação é guardada no parâmetro binário  $X_{CSe(CS,Eve)}$ . Desta forma, o algoritmo no instante  $t$  é responsável por atualizar o estado da bateria neste veículo  $Eve$ ,  $\text{SOC}_{e(Eve,t)}$ , e definir o seu perfil de carregamento, adaptando-se às necessidades do veículo  $Ev$  que entrou no instante  $t$  no parque e dos restantes veículos estacionados  $Eve$ .

Define-se que o parque de estacionamento tem capacidade máxima de lugares,  $N_{Place}$ , estão instaladas no parque um número de estações de carregamento,  $N_{CS}$ . Além disso, sabe-se que no instante  $t$  existem  $N_{Ev}$ <sup>5</sup> veículos para estacionar e encontram-se no parque de estacionamento  $N_{Eve}$  veículos estacionados. Define-se que a duração de cada otimização será entre o período  $t_i$  e o período  $t_{LastEV}$ , e que a duração de cada período é  $T_{Duration}$ . Na Figura 12, apresenta-se um esquema dos parâmetros desta otimização.

<sup>5</sup> Na abordagem deste problema, assume-se sempre que  $N_{Ev} = 1$ . Ou seja, estaciona-se um veículo de cada vez, mesmo que existam dois a chegar no mesmo período. As fórmulas matemáticas estão dimensionadas para estacionar mais que um no mesmo período caso no futuro se pretenda alterar a abordagem feita neste estudo.



Figura 12 - Dados e parâmetros dos VEs, dos CS e do Parque de Estacionamento.

Para ilustrar a dinâmica temporal da metodologia apresentada nesta seção, observe-se o exemplo na Figura 13. O veículo 1 entra no parque e o estacionamento durará 5 horas. O sistema efetuará um escalonamento para este veículo com uma duração de 5 horas. Passado duas horas, o veículo 2 entra no parque e informa que estará estacionado 7 horas. O sistema executa uma otimização para os veículos 1 e 2 com um período de 7 horas, sabendo que ao fim de 3 horas o veículo 1 já não estará no parque. Passado duas horas, o veículo 3 chega ao parque e pretende sair do parque passado 4 horas. Desta forma, a otimização desenha o comportamento de carregamento dos três veículos, com uma duração de 5 horas, uma vez que o veículo 1 permanece mais 1 hora no parque, o veículo 3 permanece 4 horas e o veículo 2 permanece 5 horas.

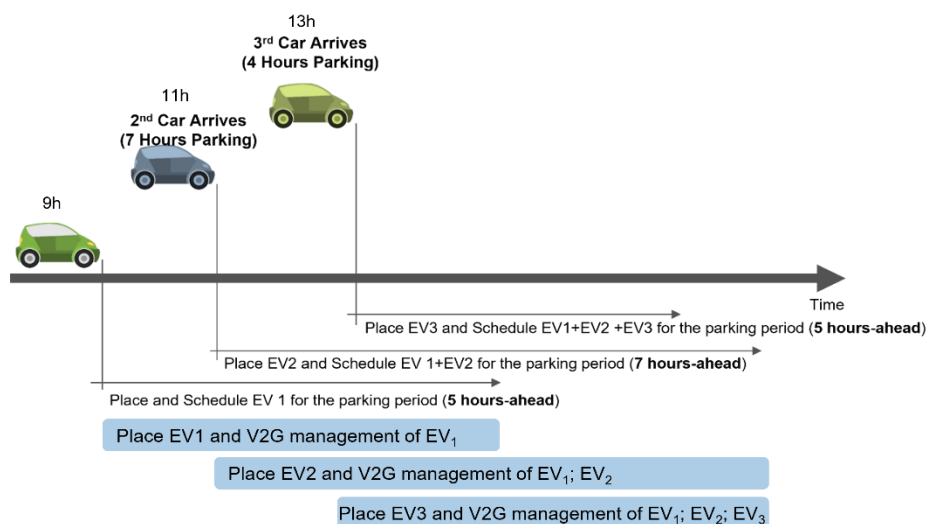


Figura 13 - Esquemático ilustrativo da definição do período de otimização.

Em relação à conectividade entre os softwares (Figura 14), nesta versão o MATLAB irá enviar para o GAMS, sempre que o veículo  $EV$  entra no parque de estacionamento, os dados deste mesmo veículo

e dos veículos estacionados  $Eve$ . Assim como os restantes dados e parâmetros das estações de carregamento, dos circuitos e do parque de estacionamento.

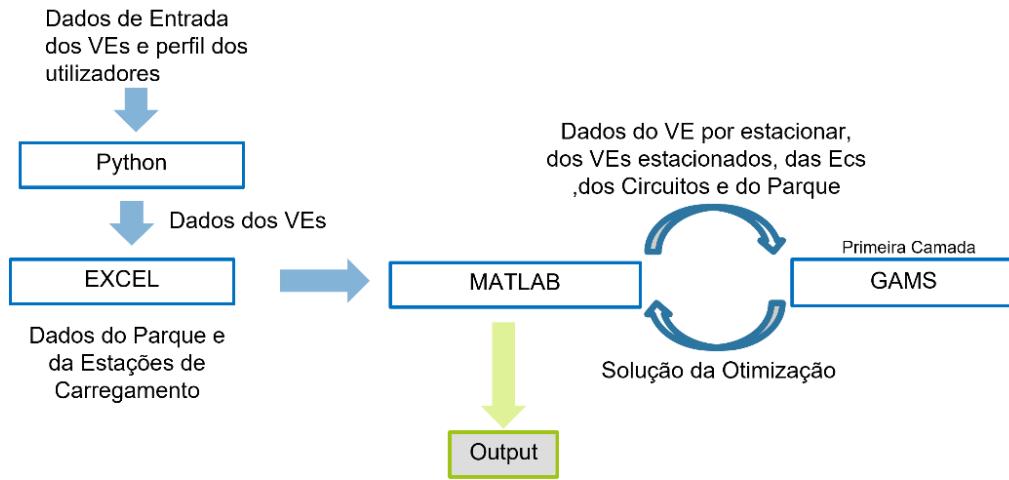


Figura 14-Estrutura da conectividade entre os softwares - Versão "Duração do Estacionamento".

### 3.2.1.1. Função Objetivo

Na metodologia proposta a função objetivo,  $F_{obj2}$ , é a seguinte (equação 2.1):

$$\begin{aligned}
 F_{obj2} = & \sum_{Eve=1}^{N_{Eve}} \left[ \alpha \times (SOC_{ereq}(Eve) - SOC_{e(Eve,t_{final}(Eve))}) + aux_{minSOCe}(Eve) + \right. \\
 & \left. \sum_{t=1}^{T_{finalT}} \left( P_{Dche}(Eve,t) + (X_{Dche}(Eve,t+1) - X_{Dche}(Eve,t)) \right) \right] \\
 & + \sum_{Ev=1}^{N_{Ev}} \left[ \alpha \times (SOC_{req}(Ev) - SOC_{(Ev,t_{final}(Ev))}) + aux_{minSOC}(Ev) \right. \\
 & \left. \sum_{t=1}^{T_{finalT}} \left( P_{Dch}(Ev,t) + (X_{Dch}(Ev,t+1) - X_{Dch}(Ev,t)) \right) \right] \\
 & + \sum_{t=1}^{T_{finalT}} MinSoC(t)
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Sendo que  $\alpha$  é um fator que se multiplica pela diferença entre o estado da bateria que os utilizadores requereram ao entrar no parque,  $SOC_{req}(Ev)$  e  $SOC_{ereq}(Eve)$ , e o estado da bateria que os veículos saem do parque,  $SOC_{(Ev,t_{final}(Ev))}$  e  $SOC_{e(Eve,t_{final}(Eve))}$ . Com isto, pretende-se aumentar o peso destas parcelas e garantir que os utilizadores estão satisfeitos, que é o principal objetivo deste primeiro nível de otimização. De seguida, surgem as parcelas que penalizam as potências ativas de descarga dos veículos,  $P_{Dch}(Ev,t)$  e  $P_{Dche}(Eve,t)$ . Adicionou-se uma parcela para garantir que a descarga de veículos é efetuada de forma contínua, através das variáveis de controlo da descarga,  $X_{Dch}(Ev,t)$  e  $X_{Dche}(Eve,t)$  e das parcelas,  $aux_{Pch}(Ev,t)$  e  $aux_{Pche}(Eve,t)$  que são variáveis de relaxação do problema que visam penalizar a função objetivo caso a solução não respeite os dois limites da potência ativa de carregamento que serão definidos nas restrições. Além disso, as parcelas  $aux_{minSOC}(Ev)$  e



$aux_{minSOcE(Eve)}$  são variáveis que visam a penalizar caso os veículos ultrapassem o limite mínimo estipulado para o estado da bateria. Por último, acrescentou-se uma variável que representa o estado da bateria do veículo com menos energia armazenada (em percentagem) no instante  $t$ ,  $MinSoc(t)$ . Assim, garante-se que o veículo com menos carga na bateria é sempre carregado.

### 3.2.1.2. Restrições

Na secção presente, explica-se as restrições associadas à segunda metodologia. A função objetivo apresentada na secção anterior está sujeita a restrições a nível do parque de estacionamento, dos circuitos, das estações de carregamento e dos veículos.

Começa-se por identificar as restrições associadas ao parque de estacionamento. Sabe-se que as instalações dos parques de estacionamento estão limitadas por uma potência ativa máxima,  $P_{ParkMax}$ , que poderá ser de cariz técnico ou contractual. Assim, tem-se que as potências ativas consumidas pelas estações de carregamento não poderão exceder a capacidade limite do parque. O balanço entre a potência ativa de carregamento da estação de carregamento  $CS$  no instante  $t$ ,  $P_{CS_C(CS,t)}$ , e a potência ativa de descarregamento da estação de carregamento  $CS$  no instante  $t$ ,  $P_{CS_D(CS,t)}$ , sobre a eficiência das estações de carregamento,  $Eff_{CS(CS)}$ , terá de ser igual ou inferior ao limite da potência instalado no parque,  $P_{ParkMax}$  (equação 1.2).

Nesta metodologia adicionou-se o conceito de circuitos elétricos. No dimensionamento da canalização elétrica do parque, tem-se em consideração as propriedades dos condutores e o comprimento dos cabos necessário para efetuar as ligações. Os cabos possuem um limite de funcionamento térmico que não deverão ultrapassar, que limita a corrente/potência que estes podem distribuir. Assim, pretende-se criar um mecanismo que simula o limite térmico de funcionamento entre a fonte de energia e as estações de carregamento. Para tal, implementou-se o conceito de "circuitos": as estações de carregamento que estão conectadas à fonte de energia através do mesmo cabo, tem de respeitar o limite térmico de canalização (Figura 15).

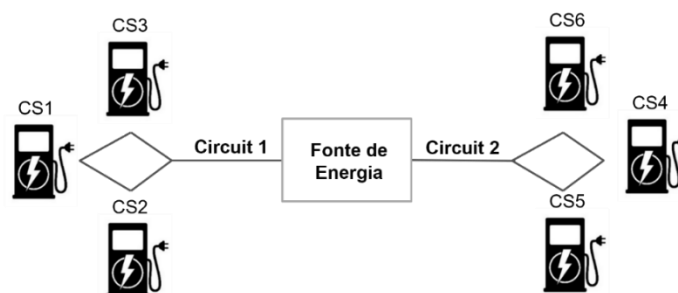


Figura 15 - Esquemático ilustrativo do conceito de "Circuito".

Assim, sabe-se que as instalações elétricas do parque de estacionamento dividem-se em circuitos,  $N_{Circuits}$ , e que cada circuito tem um limiar de potência ativa que pode operar,  $P_{cirMax(Circuit)}$ . Cada estação de carregamento está ligada à fonte de energia por um desses circuitos, sendo que esta informação está guardada no parâmetro binário  $X_{Circuit(CS,Circuit)}$ . Tem-se que o balanço entre as

potências ativas de carregamento dos de cada estação de carregamento conectada pelo mesmo circuito tem de respeitar a potência ativa limite do mesmo:

Como já referido na secção 3.2.1, nesta metodologia a otimização aloca os veículos às estações de carregamento e em pós-processamento aloca-se o veículo ao lugar de estacionamento. Esta alteração foi efetuada com vista a diminuir a dimensão da variável que aloca o veículo a um lugar. Uma vez que na perspetiva energética e sabendo que cada estação de carregamento  $CS$  carrega mais que um lugar, a escolha do lugar é irrelevante dentro da mesma estação de carregamento  $CS$ .

O parâmetro binário  $X_{CSFull(CS)}$  guardada nas estações de carregamento que estão ocupadas quando um determinado veículo entra no parque. Assim, a variável binária  $X_{CS(CS)}$  define a estação de carregamento que o veículo  $Ev$  é alocado no instante que entrou no parque, sendo que esta  $CS$  tem de ter lugares disponíveis. Além disso, tem-se de garantir que o veículo  $Ev$  é alocado a uma estação de carregamento. Tanto o parâmetro  $X_{CSFull(CS)}$  como a variável  $X_{CS(CS)}$  não estão dependentes de  $t$ , uma vez que para alocar um veículo a uma estação de carregamento é somente necessário analisar as que estão livres no instante em que ele entra no parque e não durante toda a sua estadia.

Analise-se de seguida as restrições associadas ao comportamento da estação de carregamento  $CS$ . A variável binária  $X_{CS(CS,Ev)}$  atribui uma  $CS$  ao veículo que está estacionado enquanto o parâmetro  $X_{CSe(CS,Eve)}$  guarda os veículos estacionados que estão alocados a estação de carregamento  $CS$ . Assim, potência ativa de carregamento da estação de carregamento  $CS$  no instante  $t$ ,  $P_{CS_C(CS,t)}$ , é igual a soma de todas as potências ativas dos veículos que estão conectados à estação de carregamento  $CS$ . O mesmo ocorre para a potência ativa de descarregamento  $CS$  no instante  $t$ ,  $P_{CS_D(CS,t)}$ .

A estação de carregamento  $CS$  tem limites de potência ativa,  $P_{CSmax(CS)}$ . Desta forma, as potências ativas de carregamento e descarregamento não deverão ultrapassar este limite:

As seguintes restrições e equações referentes aos veículos. De forma a controlar o estado de carregamento e descarregamento de cada veículo e de assegurar que o  $EV$  não descarrega e carrega em simultâneo acrescentou-se duas variáveis binárias  $X_{Ch(Ev,t)}$  e  $X_{Dch(Ev,t)}$  que definem o estado de carregamento ou descarregamento do veículo a estacionar e as variáveis  $X_{Che(Eve,t)}$  e  $X_{Dche(Eve,t)}$  que executam a mesma ação para os veículos já estacionados. Sendo que as variáveis assumem o valor de 1 quando o veículo se encontra em carregamento ou descarregamento e o valor 0 quando o veículo não se encontra nem a carregar ou a descarregar. Para tal, define-se que o veículo não pode descarregar e carregar em simultâneo, ou seja, as somas das duas variáveis binárias têm de ser menores ou iguais a 1:

Seguem-se as restrições associadas aos veículos. As potências ativas de carregamento,  $P_{Ch(Ev,t)}$  e  $P_{Che(Eve,t)}$  e descarregamento,  $P_{Dch(Ev,t)}$  e  $P_{Dche(Eve,t)}$ , dos veículos no instante  $t$ , estão limitadas por especificações técnicas fornecidas pelos fabricantes e tem de respeitar os comandos de carga e descarga,  $X_{Ch(Ev,t)}$ ,  $X_{Dch(Ev,t)}$ ,  $X_{Che(Eve,t)}$  e  $X_{Dche(Eve,t)}$ . Nas especificações dos modelos é referido o limite de potência ativa de carregamento e descarregamento que cada veículo  $Ev$  pode atingir,  $P_{Chmax(Ev)}$  e

$P_{Chemax(Ev)}$ , e ainda se definiu que o mínimo para a potência ativa de carregamento e descarregamentos dos veículos,  $P_{Chmin(Ev,t)}$ .

Outro ponto importante desta metodologia é que se considera a evolução da corrente de carregamento absorvida pelas baterias de íões de lítio equipadas nos veículos. Isto é, no processo de carregamento de baterias de íões de lítio, o tempo de carregamento entre os 0% e os 80 % é menor do que o tempo de carregamento entre os 80% e os 100%. As baterias dos EVs são compostas por diversas células de íões de lítio, associadas em paralelo ou em serie. Por exemplo, a bateria do Nissan Leaf de 2019, é uma bateria de lítio composta por 192 células, que garantem bateria de 40 kWh [47] .

Na Figura 16 está demonstrado o fenómeno para uma célula de íão de lítio: no eixo das abcissas está representando o tempo de carregamento e o gráfico a azul representa o estado de carregamento da célula. É possível verificar que para atingir os 80% é necessário aproximadamente uma hora de carregamento, enquanto o carregamento dos últimos 20% da capacidade da célula demora aproximadamente de duas horas.

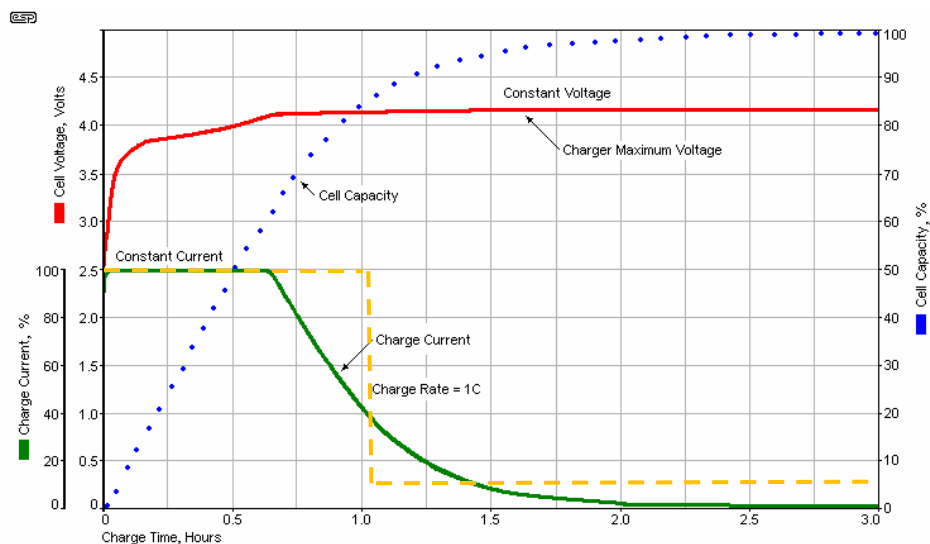


Figura 16 - Evolução da Corrente e Tensão absorvida por uma célula de Lítio ao longo do tempo[48].

De forma a simular este fenómeno, definiu-se que os veículos teriam dois limites para a potência ativa de carregamento e descarregamento (linha laranja a tracejado a laranja): no primeiro nível de carregamento definiu-se que o veículo poderia carregar à potência ativa máxima de carregamento/descarga do veículo,  $P_{Chmax(Ev)}$ , enquanto no segundo o limite é definido por cerca 11% da potência máxima de carregamento. Considera-se que a potência ativa máxima de carregamento de todos os veículos é de 100 kW.

Este fenómeno só ocorre quando os veículos estão a ser carregados por uma estação de carregamento com potência ativas elevadas. Tome-se como exemplo um caso em que a potência máxima de uma estação de carregamento é de 22 kW. Define-se então que no primeiro nível a potência de carregamento do EV é imposto pela potência máxima da CS, 22 kW, e que no segundo nível a potência máxima de carregamento seria 50 % da corrente, ao qual estimou-se que o valor seria próximo dos 11

kW. Por outro lado, para CS com potência ativa máxima de 11 kW, não se verificam estes dois níveis, pois o veículo será sempre carregado 11% da corrente de carregamento.

Desta forma tem-se que a potência ativa de carregamento de cada veículo será a soma entre os dois níveis de potência:

De salientar, que os valores dos limites poderão ser alterados consoante as especificações dos modelos dos veículos que o fabricante disponibiliza. Sendo que no caso do estudo presente, de forma a simplificar utilizou-se os mesmos limites para todos os veículos.

Em relação ao balanço energético, implementou-se dois estados de bateria para cada veículo, o estado da bateria no instante  $t$  para o nível entre os 0% e os 80%,  $SOC_{1(Ev,t)}$  e  $SOC_{1e(Eve,t)}$ ; e o estado da bateria no instante  $t$  para o nível entre os 80% e os 100%,  $SOC_{2(Ev,t)}$  e  $SOC_{2e(Eve,t)}$ :

Desta forma, os balanços energéticos dos veículos são igualmente divididos pelos dois níveis. Assim o estado da bateria do veículo  $Ev$  no instante  $t$  é a soma entre os dois níveis do estado bateria,  $SOC_{1(Ev,t)}$  e  $SOC_{2(Ev,t)}$ ,  $SOC_{1e(Eve,t)}$  e  $SOC_{2e(Eve,t)}$ . O limite máximo do estado da bateria dos veículos é definido pela capacidade máxima da sua bateria e ainda foi definido que os veículos não podem ser descarregados abaixo dos 20% da capacidade da sua bateria.

Sendo assim, o primeiro nível carrega e descarrega à potência ativa limitada pelo primeiro nível de carregamento, sendo que quando o veículo  $Ev$  entra no parque verifica-se se o este já tem os 80% da bateria ou ainda não e guarda-se esse valor na variável  $SOC_{iLevel1(Ev)}$ . Por exemplo, se o veículo entrar no parque com 70%, esse será o valor da variável  $SOC_{iLevel1(Ev)}$  enquanto a variável  $SOC_{iLevel2(Ev)}$  assume um valor nulo. Caso um veículo entre com 85% de carga na sua bateria, a variável  $SOC_{iLevel1(Ev)}$  será igual a 80% e a variável  $SOC_{iLevel2(Ev)}$  assumirá o valor de 5%.<sup>6</sup> Sendo que se aplica as equações no primeiro período da otimização, nos períodos em que o veículo está estacionado e quando o veículo sai do parque.

O segundo nível, por sua vez, carrega e descarrega à potência ativa limitada pelos 11 kW-

Segue-se o mesmo raciocínio para os veículos já estacionados  $Eve$ , sendo que agora as variáveis  $SOC_{iLevel1(Ev)}$  e  $SOC_{iLevel2(Ev)}$  não assumem o valor quando o veículo entrou no parque, mas sim o valor no estado da bateria no instante  $t_i$ :

De forma a garantir que o segundo nível só inicia o carregamento quando o primeiro nível estiver terminado, adicionou-se às restrições de forma as variáveis de comando de carregamento e descarregamento do primeiro nível só assumirem o valor 0 caso a bateria do veículo já tenha atingido os 80%. Isto é conseguido através da minimização das variáveis  $aux_{Pch(Ev,t)}$  e  $aux_{Pche(Eve,t)}$  na função objetivo.

---

<sup>6</sup> Neste caso, de forma a facilitar a comparação entre os níveis, tratou-se das variáveis  $SOC_{iLevel1(Ev)}$  e  $SOC_{iLevel2(Ev)}$  como percentagens. Contudo na realidade, ambas assumem valores absolutos de energia em kWh.

### 3.3. Segundo Nível

Nesta secção apresenta-se a metodologia usada na implementação do segundo nível de otimização. O segundo nível de otimização está situado em cada uma das CS é responsável pela otimização do carregamento dos veículos em cada instante. Desta forma, a cada minuto o operador principal envia a seguinte informação para cada CS:

- O número de veículos ligados a cada estação de carregamento,  $N_{EvCS}$ ;
- As características dos modelos dos veículos estacionados em cada CS;
- O estado da bateria de cada veículo no minuto atual,  $SOC_{(Eve)}$ , que estão estacionados numa determinada CS;
- O estado da bateria que o utilizador do veículo estacionado numa determina CS requisitou quando entrou no parque de estacionamento  $SOC_{req(Eve)}$ ;
- Potência ativa de carregamento,  $P_{ChFirst(Eve)}$  e descarregamento,  $P_{DchFirst(Eve)}$  escalonada pelo primeiro nível de otimização de cada veículo que está estacionado numa determinada CS.

Importante realçar que o segundo nível de otimização não tem dependência no tempo, uma vez que este executa uma otimização a cada instante  $t_2$ . Além disso, este algoritmo tem como responsabilidade otimizar a gestão entre a rede e os veículos, sendo que não tem qualquer responsabilidade em estacionar os veículos.

#### 3.3.1. Função objetivo

A função objetivo,  $F_{obj3}$ , da metodologia implementada no segundo nível de otimização é a seguinte (equação 3.1):

$$F_{obj3} = \sum_{Eve=1}^{N_{EvCS}} \left( (SOC_{req(Eve)} - SOC_{(Eve)}) - P_{aux(Eve)} \right) \quad (3.1)$$

Pretende-se que a cada minuto este nível de otimização minimize a diferença entre a energia requerida pelo utilizador,  $SOC_{req(Eve)}$ , e a energia do veículo naquele determinado minuto,  $SOC_{(Eve)}$ . Além disso, pretende-se a potência ativa de carregamento,  $P_{Ch(Eve)}$  seja igual ou superior (sempre que possível e necessário) à potência ativa atribuída no primeiro nível. Para isso, utiliza-se o fator  $P_{aux(Eve)}$ , de forma não permitir que o segundo nível atribua uma potência ativa de carregamento inferior ao primeiro nível e que a função objetivo seja beneficiada sempre que a potência do segundo nível for superior ao primeiro nível (equações 3.2 e 3.3):

$$P_{aux(Eve)} = P_{ChFirst(Eve)} - P_{Ch(Eve)}; \forall Eve \in \{1, \dots, N_{EvCS}\} \quad (3.2)$$

$$P_{aux(Eve)} \geq 0 ; \forall Eve \in \{1, \dots, N_{EvCS}\} \quad (3.3)$$

### 3.3.2. Restrições

A função objetivo do segundo nível de otimização implementado na metodologia proposta está somente sujeita às restrições das estações de carregamento e dos veículos. As potências ativas de carregamento,  $P_{CS_C(CS)}$  e descarregamento,  $P_{CS_D(CS)}$ , da estação de carregamento é limitada pelas especificações técnicas da mesma,  $P_{CS_{max}(CS)}$ :

Desta forma, as potências ativas de carregamento,  $P_{CS_C(CS)}$ , e descarregamento,  $P_{CS_D(CS)}$ , são definidas pelo somatório de todas as potências ativas de carregamento,  $P_{Ch(Eve)}$ , e descarregamento,  $P_{Dch(Eve)}$ , dos veículos alocados a uma determinada CS num determinado minuto.

De seguida, apresentam-se as restrições e equações associadas aos veículos. Começa-se por definir que o segundo nível irá respeitar o primeiro nível quando este último indica que um veículo *Eve* tem de carregar durante o período  $t$ . Caso o primeiro nível indique que o veículo *Eve* não se encontra a carregar, o segundo nível poderá decidir, se houver condições e necessidade, se este carrega ou não. Para tal, o segundo nível recebe o parâmetro binário  $X_{Chfirst(Eve)}$  que indica o estado de carregamento que o primeiro nível atribui para este veículo num determinado minuto. Desta forma, o valor da variável  $X_{Ch(Eve)}$  terá que ser igual o maior ao parâmetro  $X_{Chfirst(Eve)}$ :

Sendo que o segundo nível pretende igualar ou aumentar o valor da potência ativa de carregamento de cada *Eve* as restrições do  $P_{Ch(Eve)}$  mantêm-se iguais do primeiro nível:

Em relação à potência ativa de descarga de cada veículo *Eve*,  $P_{Dch(Eve)}$ , pretende-se que o segundo nível respeite na integra os períodos em que o primeiro nível atribuiu para realizar a descarga e os valores das potências ativas que o primeiro nível atribui:

Este mecanismo garante que o veículo que é descarregado tem ainda possibilidade de carregar durante o tempo que está no parque. O primeiro nível tem acesso a mais informação, nomeadamente, o tempo de duração da estadia, enquanto o segundo nível só analisa um determinado instante.

### 3.3.3. Interligação entre o primeiro e segundo nível de otimização

Como já referido anteriormente, o segundo nível está localizado em cada uma das CSs do parque de estacionamento e é executado em cada instante. Este processo ocorre em paralelo em cada uma das CS, sendo que obriga a uma verificação se as regras do parque estão a ser cumpridas. Para isso, após o todas as CSs executarem o escalonamento para um determinado instante, enviam para o primeiro nível os resultados das suas otimizações para este verificar:

- A potência total do parque está a ser respeitada
- A potência de cada circuito está a ser respeitada

Caso todas as restrições estejam a ser respeitadas, o operador principal autoriza cada CS a executar o planeamento pelo operador local. Caso contrário, o primeiro nível verifica qual a potência ativa que tem disponível a mais no parque num determinado instante,  $P_{extra}$ , e divide igualmente por todas as

CS que estão a carregar veículos,  $N_{CSCharging}$ . Obtém-se assim que a potência ativa de cada CS,  $P_{CS_C}(CS)$ , a ser igual esta a potência ativa que o primeiro nível atribui,  $P_{CSfirst(CS)}$ , mais a potência ativa extra dividida por todas as CS

Sendo que  $P_{firstlayer}$  corresponde à potência ativa consumida pelo parque de estacionamento. O mesmo raciocínio é utilizado para os circuitos, de forma que o segundo nível também respeite o limite de cada circuito. Neste caso, analisa-se a potência ativa extra em cada um dos circuitos e distribui-se igualmente por todas as CS,  $N_{CSChargingCir}$ , que estão em carregamento associadas a esse circuito

Após os limites potências ativas de carregamento estar definidas pelo primeiro nível, o segundo nível volta a executar a otimização com estes limites e com a variável  $P_{aux(Eve)}$  presente na função objetivo,  $F_{obj3}$ , com o valor nulo. Desta forma, garante-se que o segundo nível de otimização vai respeitar as regras do parque.

## 4. Construção de Cenários

Neste capítulo é apresentada a ferramenta utilizada para a criação de cenários realista para testar as metodologias propostas nesta dissertação de mestrado. Tendo em consideração a estrutura de conectividade de softwares apresentada na Figura 10, no início do processo de simulação, utiliza-se uma função desenvolvida em *Python* para gerar perfis de utilizadores que vão de encontro às necessidades realistas dos utilizadores de veículos elétricos.

### 4.1. Parâmetros dos Cenários

Nesta secção é apresentada a ferramenta utilizada para criar cenários realistas de entrada de veículos elétricos nos parques de estacionamento. A ferramenta tem em consideração as características dos veículos elétricos e diferentes perfis de utilização, com o objetivo de simular e testar o sistema de gestão em vários cenários. A ferramenta necessita dos seguintes parâmetros para cada cenário criado:

- **Número de lugares de estacionamento,  $N_{places}$ ;**
- **Potência ativa instalada no parque,  $P_{ParkMax}$ :** Uma vez que o fator de simultaneidade para parques de estacionamento dimensionados somente para veículos elétricos ainda se encontra em estudo na literatura, teve que se recorrer a uma estimativa da potência instalado nos parques de estacionamento. Sabe-se que um veículo elétrico consome em média 0,18 kWh/km [49] e, assumindo que cada utilizador necessita de pelo menos 50 km por dia para deslocações e que em média cada veículo está estacionado 6 horas (por exemplo, na Alemanha, em média um utilizador necessita de 35 km por dia [50]). Determina-se assim a potência necessária para garantir a autonomia mínima a cada veículo. Assim, obteve-se um valor estimado da potência mínima instalada no parque, contudo durante os casos de estudo analisados esse valor será alterado para estudar como as metodologias reagem a diferentes restrições.
- **Modelo do EV:** analisa-se a percentagem de cada modelo na região onde se localiza o parque;
- **Perfil do utilizador:**
  - **Período de Chegada,  $t_{i(Ev)}$ , e Período de Saída,  $t_{final(Ev)}$ :** dependendo da localização do parque e do tipo de parque, são definidos os intervalos dos períodos de chegada e de saída dos utilizadores.
  - **Energia armazenada na bateria do veículo na chegada,  $SOC_{i(Ev)}$  e de requerida pelo utilizador,  $SOC_{req(Ev)}$ :** consoante o tipo de parque, são definidos intervalos dos níveis de SOC quando os veículos entram e saem do parque de estacionamento.

Após a definição destes parâmetros, são criados aleatoriamente os diversos cenários de parques de estacionamento segundo uma distribuição normal. Os cenários criados são utilizados para estudar os algoritmos apresentados nas secções anteriores.

### 4.2. Padrões de utilizadores identificados

Começa-se por definir os modelos de veículos que estão disponíveis no mercado, sendo definida a probabilidade de cada modelo entrar no parque de estacionamento, consoante o número de vendas



registadas em Portugal [51] Na Figura 17, apresenta-se a percentagem de vendas de *BEVs* e *PHEVs* em Portugal.

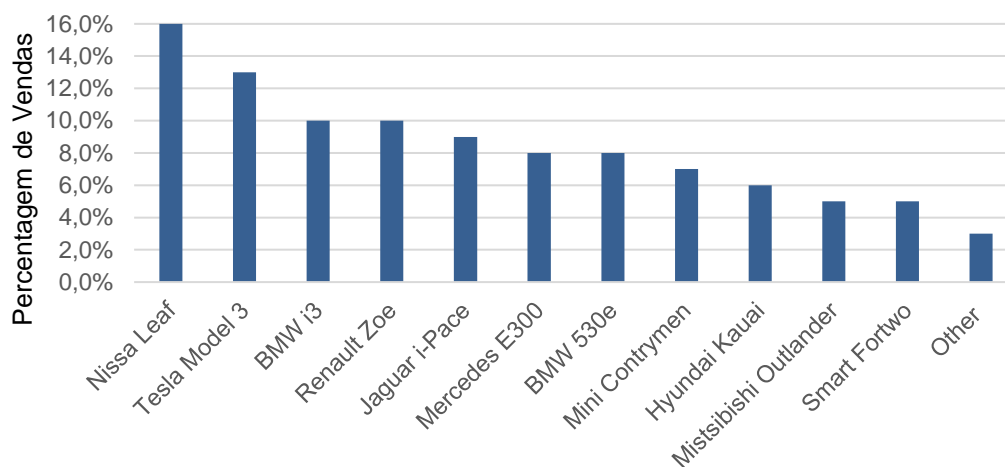


Figura 17 - Número de Vendas de *BEVs* e *PHEVs* em Portugal [51].

Além da percentagem de vendas, os modelos dos *EVs* diferenciam-se pela capacidade das baterias,  $MaxCap_{(Ev)}$ , eficiências de carregamento e descarregamento,  $Eff_{Ch(Ev)}$ . Estes valores podem ser sempre alterados na modelação do problema sendo que será assumido que todos os veículos têm 100% de eficiência de carga e descarga, uma vez que estamos a assumir que a eficiência do ciclo está englobada na eficiência das estações de carregamento. As capacidades das baterias são as apresentadas no gráfico da Figura 18:

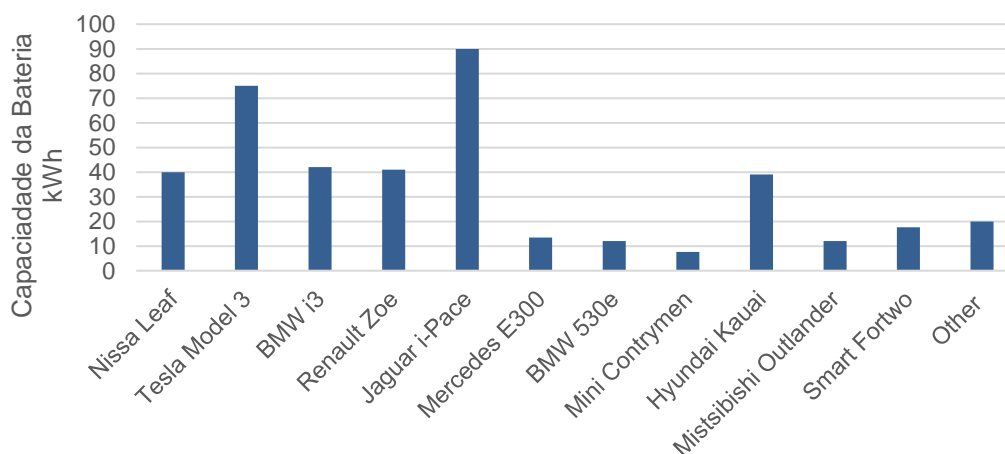


Figura 18 - Capacidade Máxima das Baterias de cada Modelo [47].

Após a definição dos modelos, identificou-se os diferentes padrões de perfis de utilizador consoante a localização do parque de estacionamento:

- **Parque Pendular:** a direção do fluxo é unidirecional, ou seja, os veículos chegam todos à mesma hora e saem no mesmo período.

- **Zona Empresarial:** parques de estacionamento situados em empresas, cujo maior fluxo de veículos encontra-se no início do dia e no final do dia de trabalho. Para tal definiu-se 4 perfis de utilizadores deste parque
  - Trabalhador tipo 1: chega ao local de trabalho por volta das 9h da manhã tendo uma jornada laboral de aproximadamente 8 horas, saindo assim entre as 17h e as 18h da tarde. Assume-se 40% dos utilizadores seria deste tipo.
  - Trabalhador tipo 2: chega ao local de trabalho por volta das 9h da manhã, tendo uma jornada laboral de aproximadamente 8 horas, saindo assim entre as 17h e as 18h da tarde. Contudo, este utilizador utiliza o *EV* para se deslocar na hora de almoço, saindo entre as 13h e as 14h. Assume-se 40% dos utilizadores seria deste tipo.
  - Visitante: não pertence aos quadros da empresa, sendo que poderá ter sido convocado para uma reunião. A sua estadia no parque será entre 1 hora e 30 minutos a 2 horas e 30 minutos. Assume-se 15% dos utilizadores seria deste tipo.
  - Veículo da empresa: este veículo é utilizado durante o dia para deslocações dos funcionários da empresa, sendo que sai do parque às 9h e só chegará por volta das 18h. Assume-se 5% dos utilizadores seria deste tipo.
- **Zona Residencial:** parques de estacionamento situados em zonas de habitação, sendo que o maior fluxo de chegada de veículos será entre as 18h e as 22h e entre as 8h e 9h.
  - Residente tipo 1: sai de casa entre as 8h e as 9h, tendo uma jornada laboral de oito horas, sendo o seu regresso previsto entre as 18h e as 22h, podendo variar se este se desloca unicamente casa-trabalho e trabalho-casa ou se ainda tem qualquer outra atividade. Assume-se 45% dos utilizadores seria deste tipo.
  - Residente tipo 2: sai de casa entre as 8h e as 9h, tendo uma jornada laboral de oito horas, sendo o seu regresso previsto entre as 18h e as 22h, podendo variar se este se desloca unicamente casa-trabalho e trabalho-casa ou se ainda tem qualquer outra atividade. Difere do residente 1, pelo fato de este se deslocar a casa na hora de almoço. Assume-se 30% dos utilizadores seria deste tipo.
  - Veículo de Fim de semana: veículo que passa grande parte do tempo estacionado na habitação do seu proprietário, sendo utilizado somente durante o fim de semana. Exemplos: utilizadores que tenham direito a veículo de empresa, tenham mais que um veículo pessoal ou que se desloquem para o trabalho de transportes públicos. Assume-se 10% dos utilizadores seria deste tipo.
  - Convidado: visita a um dos residentes do prédio. A sua estadia no parque será entre 1 hora e 30 minutos a 2 horas e 30 minutos. Assume-se 15% dos utilizadores seria deste tipo.

### 4.3. Geração dos Cenários

Nesta subsecção, explica-se detalhada do instrumento de geração de cenários, sendo que na Figura 19 apresenta-se um esquemático da ferramenta. Na etapa 1, começa-se por definir a localização do

parque e de seguida, define-se as probabilidades dos modelos dos EVs na zona/pais da sua localização e os perfis dos utilizadores consoante o tipo de parque.

De seguida, na etapa 2, utilizado uma distribuição normal aleatória e já com o número de veículos do problema definido, obtém-se os perfis de cada utilizador. Antes do cenário estar criado, ainda é necessário definir os períodos de entrada e saída dos veículos com base nos seus perfis e no tempo de duração de cada período da simulação. Por último é definido o estado das baterias, SOC, qual o EV chega ao parque e a necessidade de energia requerida no momento de partida.

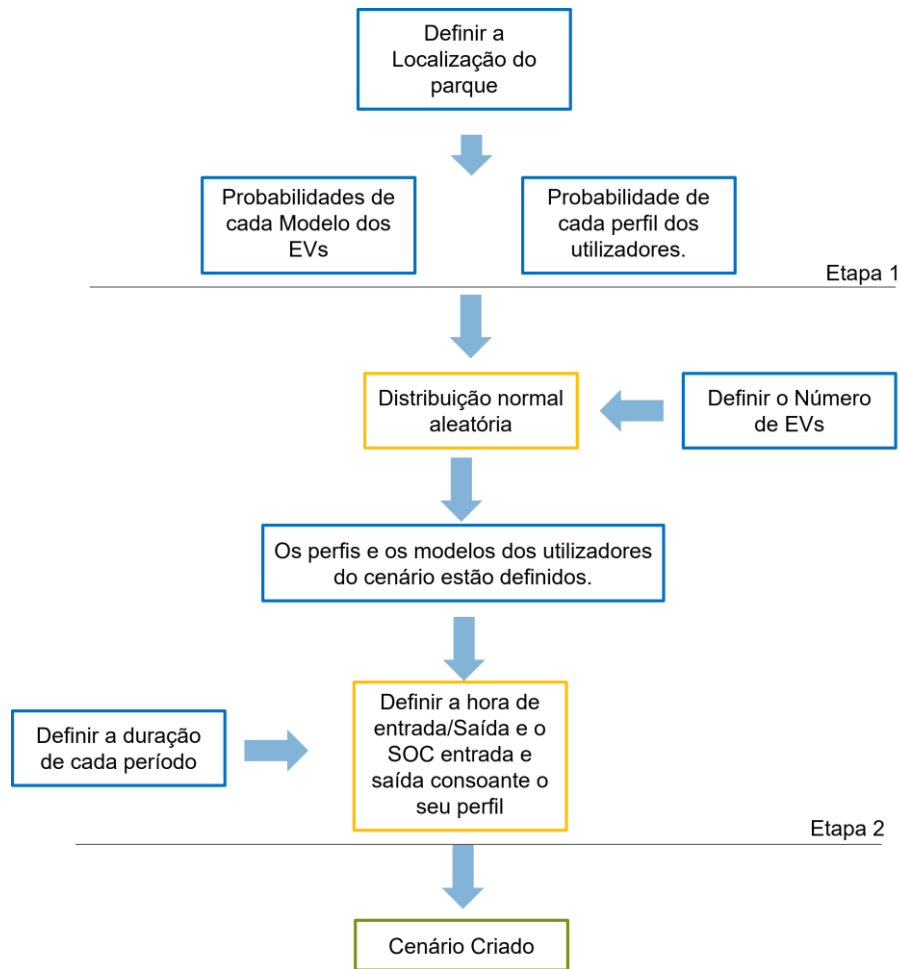


Figura 19- Esquemático da ferramenta de geração de cenários.

Considera-se assim que os cenários gerados se aproximam da realidade, simulando desafios autênticos que irão testar as metodologias propostas em diferentes perspetivas.

## 5. Casos de Estudo

Este capítulo apresenta um conjunto de casos de estudo aplicados a cada uma das metodologias propostas nesta dissertação. Primeiramente, apresenta-se de uma forma sucinta cada caso de estudo tendo em conta o objetivo da análise dos resultados obtidos. De seguida, são apresentados os resultados obtidos e a respetiva avaliação no que diz respeito às metodologias adotadas: “Dia Seguinte”; “Duração da Estadia”; e o “Sistema Hierárquico” que consiste na ligação entre a metodologia do primeiro nível de otimização “Duração da Estadia” e do segundo nível de otimização descrito na seção 3.3. Por fim são expostas as conclusões sobre os resultados obtidos para cada metodologia.

Importa ainda referir que os casos de estudo testados foram gerados recorrendo à ferramenta apresentada no capítulo 4, efetuando-se, em alguns casos, variações de forma a ser possível testar as metodologias em cenários com maior nível de exigência.

### 5.1. Introdução

Como foi mencionado na seção 4.1, foram identificadas três tipologias de parques de estacionamento: parques pendulares, parques em zonas empresariais e parques em zonas residenciais. Neste capítulo testa-se os diferentes cenários a diferentes metodologias propostas. Numa fase inicial, nas subseções 5.2. e 5.3., estudam-se a performance das duas metodologias proposta para o primeiro nível de otimização. Posteriormente na subseção 5.4, é feita a comparação da performance dos dois métodos, realçando as limitações. Por fim, implementa-se o sistema hierárquico final, composto pelos dois níveis a funcionar em simultâneo.

Assim, de modo a facilitar a leitura é apresentada, na Tabela 4, os diferentes casos de estudo identificados, tendo em conta a metodologia aplicada, o tipo de parque de estacionamento e os objetivos da análise.

| Metodologia          | Caso de Estudo (CE)                            | Tipo de Parque  | Objetivo   | Subseção |
|----------------------|--|---|--|----------|
| “Dia Seguinte”       | CE 1.1   | Pendular  | Estudar as prioridades de carregamento.                                      | 5.2.1    |
|                      | CE 1.2   | Empresarial   | Avaliar a Satisfação dos utilizadores.                                       | 5.2.2    |
| “Duração da Estadia” | CE 2.1   | Empresarial   | Avaliar a Satisfação dos Utilizadores.                                       | 5.3.1    |
|                      |  |   | Demonstrar o reajuste do perfil de carregamento sempre que um veículo entra. |          |
|                      | Impacto da tecnologia <i>vehicle-to-grid</i> . |   |  |          |
| CE 2.2               | Residencial                                    | Avaliar a vantagem de estacionar os veículos na otimização. | 5.3.2  |          |

|                     |        |             |  |       |
|---------------------|--------|-------------|--|-------|
|                     | CE 2.3 | Empresarial | Demonstrar o funcionamento da limitação imposta pelos Circuitos.             | 5.3.3 |
| Sistema Hierárquico | CE 3.1 | Empresarial | Avaliar a performance do sistema final.                                      | 5.4.1 |
|                     |        |             | Analisar a comunicação entre o primeiro e segundo nível.                     | 5.4.2 |
|                     | CE 3.2 | Empresarial | Simulação das correções em tempo real.                                       | 5.4.3 |
|                     | CE 3.3 | Empresarial | Comparar a performance do sistema hierárquico com um sistema não controlável | 5.4.4 |

Tabela 4-- Caracterização dos Casos de Estudo.

## 5.2. Metodologia “Dia Seguinte”

No primeiro caso, pretende-se testar a metodologia proposta para o primeiro nível de otimização descrita na seção 3.2.

- De forma sintética apresentam-se de seguida as características que estão subjacentes à implementação da metodologia selecionada para o presente caso de estudo, a saber: O algoritmo recebe a informação sobre cada veículo  $Ev$ : período de entrada e saída,  $t_{i(Ev)}$  e  $t_{final(Ev)}$  respetivamente, o estado da bateria inicial,  $SOC_{i(Ev)}$  e energia com que o veículo deixa o parque de estacionamento,  $SOC_{(Ev,t_{final(Ev)})}$ .
- O algoritmo, com a informação de todos os veículos e com as previsões dos eventos que vão ocorrer durante o dia, define o perfil de carregamento de cada veículo  $Ev$  e aloca cada veículo  $Ev$  a um lugar de estacionamento durante os períodos em que permanece no parque.
- A função objetivo  $F_{obj}$  tem como principal objetivo minimizar a diferença entre a energia requerida pelo utilizador,  $SOC_{req(Ev)}$ , e a energia com que o veículo deixa o parque de estacionamento,  $SOC_{(Ev,t_{final(Ev)})}$ . E pretende também carregar sempre o veículo com menor carga na bateria, maximizar a variável  $MinSOC_{(t)}$ .
- O método excetua uma otimização para um dia inteiro, dividindo o dia em intervalos de 15 minutos,  $T_{duration} = 15 \text{ minutos}$ .

### 5.2.1. CE 1.1 - Parque Pendular

O primeiro cenário a ser estudado utiliza um parque de estacionamento pendular, em que por definição, os utilizadores têm um comportamento unidirecional, ou seja, chegam todos no mesmo período e saem igualmente no mesmo período. Foi considerado igualmente que o parque de estacionamento tem capacidade para 10 veículos e definiu-se que todos os veículos chegam às 9h e saem no mesmo às 18h.

O objetivo deste cenário pretende estudar a forma como o sistema gere as prioridades de carregamento, tendo unicamente em consideração as necessidades energéticas dos utilizadores.

A avaliação da performance do algoritmo é feita através:

- da satisfação dos utilizadores através da análise da diferença entre a energia requerida,  $SOC_{req(Ev)}$  e a energia final de cada veículo,  $SOC_{(Ev,t_{final(Ev)})}$ ;
- do diagrama temporal da potência ativa de carregamento de cada veículo,  $P_{Ch(Ev,t)}$ .

Na Tabela 5 são apresentadas as características do cenário: o parque tem de estacionamento para 10 veículo, sendo equipado com 2 CSs com uma potência máxima de carregamento de 11 kW cada uma, sendo a potência máxima instalada no parque de 25 kW.

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| <b>Veículos</b>                 | $N_{Ev} = 10$   |
| <b>Estação de Carregamento</b>  | $N_{CS} = 2$<br>$N_{EvCS} = 5$<br>$P_{CSmax(CS)} = 11 \text{ kW}$ |
| <b>Parque de estacionamento</b> | $P_{ParkMax} = 25 \text{ kW}$                                     |

Tabela 5 - Caracterização do Cenário 1 - Caso de Estudo 1.

Importa ainda referir que a ferramenta descrita na secção 4 é utilizada para gerar os 10 veículos de diferentes modelos e com diferentes necessidades energéticas (Tabela 6). Assim, são apresentados os valores absolutos da energia armazenada nas baterias quando os veículos entram no parque e a energia requerida pelos utilizadores,  $SOC_{i(Ev)}$  e  $SOC_{req(Ev)}$  respetivamente, assim como valor absoluto da energia requerida,  $\Delta SOC_{1(Ev)}$ .

| ID | Modelo          | $MaxCap_{(Ev)}$<br>kWh | $t_{i(Ev)}$ | $t_{final(Ev)}$ | $SOC_{i(Ev)}$<br>% | $SOC_{req(Ev)}$<br>(%) |
|----|-----------------|------------------------|-------------|-----------------|--------------------|------------------------|
| 1  | Jaguar i-Pace   | 90                     | 9:00        | 18:00           | 95                 | 100                    |
| 2  | Jaguar i-Pace   | 90                     | 9:00        | 18:00           | 70                 | 100                    |
| 3  | Mercedes E300   | 13,5                   | 9:00        | 18:00           | 50                 | 100                    |
| 4  | Mini Countrymen | 7,6                    | 9:00        | 18:00           | 40                 | 100                    |
| 5  | Jaguar i-Pace   | 90                     | 9:00        | 18:00           | 45                 | 100                    |
| 6  | Tesla Model 3   | 75                     | 9:00        | 18:00           | 30                 | 100                    |
| 7  | Tesla Model 3   | 75                     | 9:00        | 18:00           | 60                 | 100                    |
| 8  | Mini Countrymen | 7,6                    | 9:00        | 18:00           | 50                 | 100                    |
| 9  | Tesla Model 3   | 75                     | 9:00        | 18:00           | 75                 | 100                    |
| 10 | Nissan Leaf     | 40                     | 9:00        | 18:00           | 60                 | 100                    |

Tabela 6 - Caracterização do perfil dos utilizadores – CE 1.1.

Posteriormente na Tabela 7 - Caracterização dos Estados das Baterias dos veículos– são apresentados os valores da energia quando o veículo sai do parque,  $SOC_{(Ev,t_{final(Ev)})}$ , e a diferença entre a energia requerida e a energia final,  $\Delta SOC_{2(Ev)}$ , demonstrando o nível de satisfação dos utilizadores.

| ID | $SOC_{i(Ev)}$<br>kWh | $SOC_{req(Ev)}$<br>kWh | $\Delta SOC_{1(Ev)}$<br>kWh | $SOC_{(Ev,t_{final(Ev)})}$<br>kWh | $\Delta SOC_{2(Ev)}$<br>kWh |
|----|----------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 85,5                 | 90                     | 4,5                         | 85,5                              | 4,5                         |
| 2  | 63                   | 90                     | 27                          | 86,42                             | 3,58                        |
| 3  | 6,75                 | 13,5                   | 6,75                        | 13,5                              | 0                           |
| 4  | 3,04                 | 7,6                    | 4,56                        | 7,29                              | 0,31                        |
| 5  | 40,5                 | 90                     | 49,5                        | 90                                | 0                           |
| 6  | 22,5                 | 75                     | 52,5                        | 75                                | 0                           |
| 7  | 45                   | 75                     | 30                          | 71,25                             | 4,75                        |
| 8  | 1,53                 | 7,6                    | 6,07                        | 7,6                               | 0                           |
| 9  | 56,25                | 75                     | 18,75                       | 75                                | 0                           |
| 10 | 24                   | 40                     | 16                          | 40                                | 0                           |

Tabela 7 - Caracterização dos Estados das Baterias dos veículos– CE 1.1.

Podemos concluir que da análise dos resultados obtidos verifica-se que a maioria dos veículos atinge o nível de energia requerido. Para completar a análise dos resultados, apresenta-se a evolução temporal da potência ativa de carregamento,  $P_{Ch(Ev,t)}$ , de todos os veículos na Figura 20.

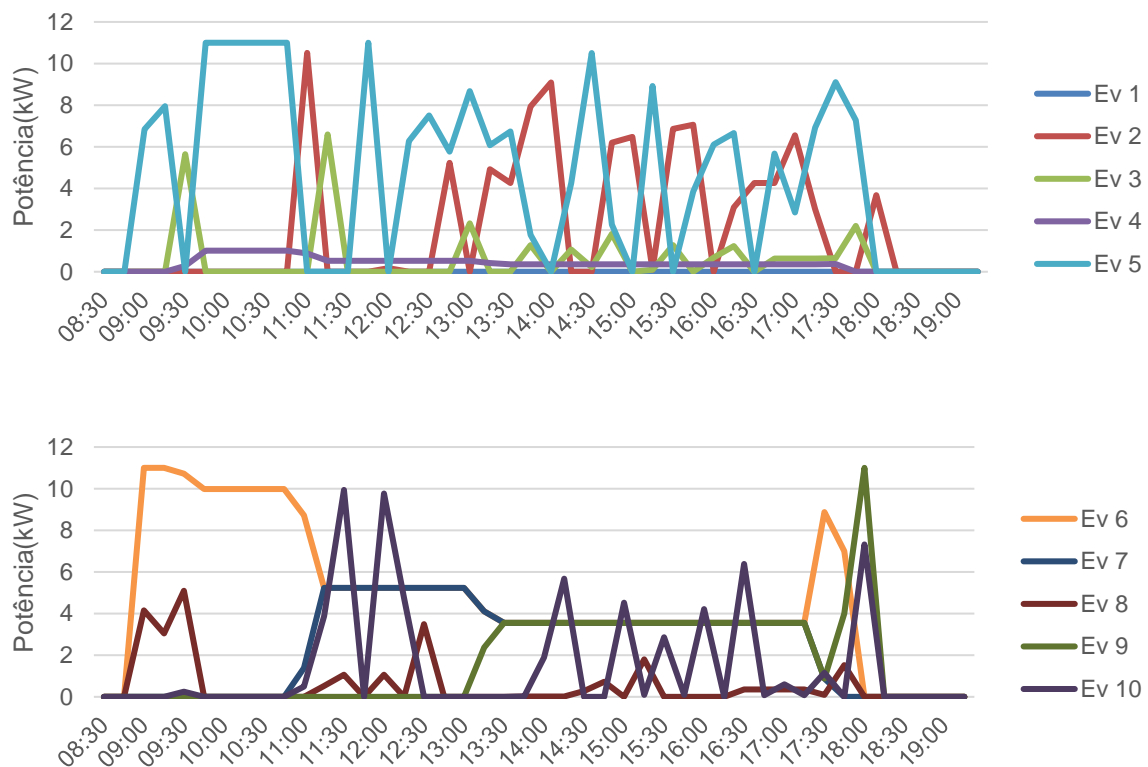


Figura 20 - Diagrama Temporal da Potência Ativa de Carregamento de cada EV– CE 1.1.

Verifica-se que o *Ev 6* é o veículo que requer maior quantidade de energia à entrada do parque de estacionamento, 52,5 kWh. Sabendo que a metodologia, tem como principal objetivo minimizar a

diferença entre a energia requerida pelo utilizador,  $SOC_{req(Ev)}$ , e a energia com que o veículo deixa o parque de estacionamento,  $SOC_{(Ev,t_{final(Ev)})}$  (critério de satisfação do utilizador), o veículo *Ev 6* irá ser o primeiro veículo a iniciar o seu carregamento (linha a laranja). Verifica-se ainda que no instante em que este entra no parque de estacionamento, às 9h00, inicia o seu carregamento, e que pelas 11h acaba por minimizar a diferença entre os  $SOCs$  em análise na função objetivo, acabando por perder prioridade em relação a outros veículos. Voltando a ser carregado no final do dia, de forma a garantir que sai do parque com a energia requerida.

Contrariamente, o veículo *Ev 1* é aquele que requer menos energia, chegando ao parque de estacionamento com 95% da bateria do seu veículo carregada. Desta forma, este veículo será colocado no fim das prioridades, e neste cenário, não foi possível carregar até aos 100 %. Pode-se observar que este veículo não é carregado durante o seu estacionamento no gráfico da evolução do estado da bateria ao longo do estacionamento apresentado na Figura 21.

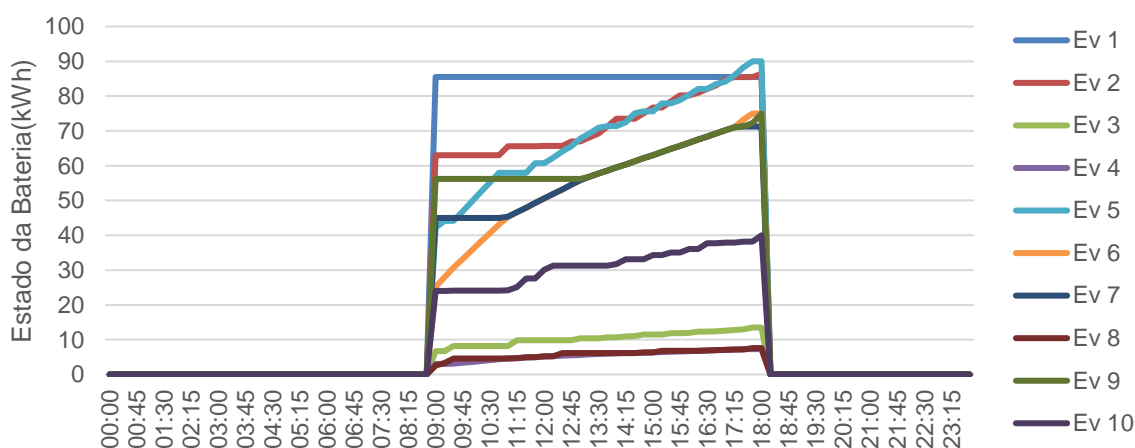


Figura 21- Diagrama Temporal do Estado de Bateria de cada EV- CE 1.1.

Em relação aos restantes veículos que não atingiram o nível de energia requerido, no caso do *Ev 4* considera-se que a diferença de 0,31 kWh se torna irrelevante. No caso dos veículos *Ev 2* e *Ev 3*, apesar de não atingirem o nível requerido, foram carregados e terminam com níveis de energia superiores a 90% da capacidade da bateria. No gráfico apresentado na Figura 22 está representado a evolução da variável  $MinSOC_{(t)}$ , que guarda o valor do estado da bateria em percentagem do veículo com menos energia armazenada.



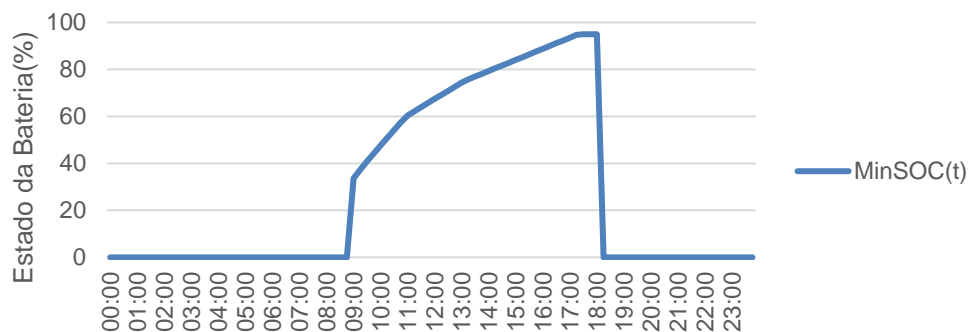


Figura 22- Diagrama Temporal do Estado da Bateria do Veículo com Menos Carga– CE 1.1.

No gráfico apresentado na Figura 23, é representado o diagrama temporal da potência ativa de carregamento de cada  $CS$ ,  $P_{CS(CS,t)}$ , e da potência ativa consumida pelo parque de estacionamento,  $P_{Park(t)}$ . Verificando-se ainda que, com as necessidades requeridas por estes utilizadores, as estações de carregamento operam no limite máximo da potência ativa durante todo o período em que os veículos permanecem no parque. Neste caso, o limite imposto pelo parque não impões restrições ao funcionamento das duas  $CS$ s. De realçar que a potência ativa do parque considera as perdas associadas à eficiência dos carregadores.



Figura 23-Diagrama Temporal da Potência Ativa de Carregamento de cada  $CS$  e do Parque– CE 1.1.

Com este cenário, demonstrou-se que o sistema respeita as regras impostas pelo limite de potência instalada no parque e pelo limite da potência ativa máxima de carregamento das  $CS$ s. Além disso, observou-se que o sistema gere o carregamento do veículo, começando por carregar primeiro os veículos que necessitam de mais energia para atingir o nível requerido pelo utilizador. Ainda foi demonstrado que o sistema consegue satisfazer a maioria dos clientes, sendo que os que não atingiram o valor de energia requerido foram atingiram valores muito próximos dos requeridos.

### 5.2.2. CE 1.2 - Parque em Zona Empresarial

Nesta subseção é apresentado um caso de estudo que considera um parque de estacionamento situado numa zona empresarial. O objetivo deste cenário pretende verificar se a metodologia proposta

consegue satisfazer os utilizadores com diferentes necessidades energéticas e durações de estacionamento.

Considera-se que o parque de estacionamento tem capacidade para estacionar 10 veículos em simultâneo, sendo equipado por duas estações de carregamento com uma potência ativa máxima de 22 kW. O parque de estacionamento possui igualmente uma potência ativa limite de 40 kW. Esta informação esta detalhada na Tabela 8:

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| <b>Veículos</b>                 | $N_{Ev} = 10$   |
| <b>Estação de Carregamento</b>  | $N_{CS} = 2$<br>$N_{EvCS} = 5$<br>$P_{CSmax(CS)} = 22 \text{ kW}$ |
| <b>Parque de estacionamento</b> | $P_{ParkMax} = 40 \text{ kW}$                                     |

Tabela 8 - Caracterização do CE 1.2.

No gráfico da Figura 24, é apresentado a ocupação do parque de estacionamento ao longo do tempo, com base nos cenários criados na secção 4.1. para parques de estacionamento em zonas empresariais, deste modo:

- Veículo 1 e 8 são veículos cujo estacionamento é de longa duração (> 12 horas);
- Veículo 2, 9 e 10 são veículos cujo estacionamento é de média duração (> 6 horas);
- Veículo 4, 6 e 7 entram e saem do parque duas vezes;
- Veículo 3 e 5 têm um estacionamento de curta duração (< 2 horas).

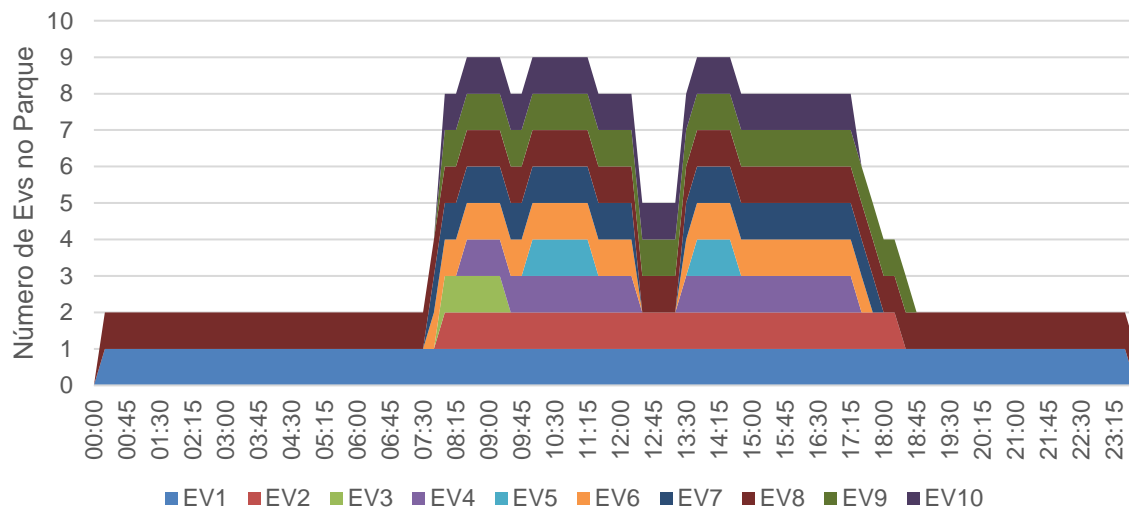


Figura 24- Gráfico da ocupação do parque ao longo dos períodos- CE 1.2.

De acordo com o referido anteriormente o perfil do utilizador é caracterizado conforme os dados apresentados na Tabela 9:

| ID | Modelo             | $MaxCap_{(Ev)}$<br>kWh | $t_{i(Ev)}$ | $t_{final(Ev)}$ | $SOC_{i(Ev)}$<br>% | $SOC_{req(Ev)}$<br>(%) |
|----|--------------------|------------------------|-------------|-----------------|--------------------|------------------------|
| 1  | Jaguar i-Pace      | 90                     | 00:15       | 23:45           | 80                 | 100                    |
| 2  | Nissan Leaf        | 40                     | 8:00        | 18:15           | 60                 | 100                    |
| 3  | Jaguar i-Pace      | 90                     | 8:00        | 9:15            | 20                 | 80                     |
| 4  | Mini<br>Countrymen | 7,6                    | 8:30        | 12:15           | 55                 | 90                     |
|    |                    |                        | 13:30       | 17:15           | 73                 | 100                    |
| 5  | Jaguar i-Pace      | 90                     | 9:15        | 10:00           | 49                 | 75                     |
|    |                    |                        | 13:45       | 14:45           | 30                 | 60                     |
| 6  | Tesla Model 3      | 75                     | 7:45        | 12:15           | 67                 | 97                     |
|    |                    |                        | 13:30       | 17:45           | 80                 | 100                    |
| 7  | Tesla Model 3      | 75                     | 7:45        | 17:15           | 62                 | 92                     |
|    |                    |                        | 13:30       | 18:00           | 82                 | 100                    |
| 8  | Mini<br>Countrymen | 7,6                    | 00:15       | 17:15           | 70                 | 90                     |
| 9  | Tesla Model 3      | 75                     | 8:00        | 17:15           | 75                 | 100                    |
| 10 | Nissan Leaf        | 40                     | 8:00        | 16:30           | 40                 | 98                     |

Tabela 9- Caracterização do perfil dos utilizadores - CE 1.2.

Aplicando a metodologia “Dia Seguinte” para este cenário, obtêm os valores da tabela seguinte, em que permite determinar os valores da energia quando o veículo sai do parque,  $SOC_{(Ev,t_{final(Ev)})}$ , e a diferença entre a energia requerida e a energia final,  $\Delta SOC_{2(Ev)}$ , determina o nível de satisfação dos utilizadores:

| ID | $SOC_{i(Ev)}$<br>kWh | $SOC_{req(Ev)}$<br>kWh | $\Delta SOC_{1(Ev)}$<br>kWh | $SOC_{(Ev,t_{final(Ev)})}$<br>kWh | $\Delta SOC_{2(Ev)}$<br>kWh |
|----|----------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 72                   | 90                     | 18                          | 90                                | 0                           |
| 2  | 24                   | 40                     | 16                          | 40                                | 0                           |
| 3  | 18                   | 72                     | 54                          | 51                                | 21                          |
| 4  | 4,18                 | 6,84                   | 2,66                        | 6,84                              | 0                           |
|    | 5,55                 | 7,6                    | 2,05                        | 7,6                               | 0                           |
| 5  | 44,1                 | 67,5                   | 23,4                        | 67,5                              | 0                           |
|    | 27                   | 54                     | 27                          | 54                                | 0                           |
| 6  | 50,25                | 72,75                  | 22,5                        | 72,25                             | 0                           |
|    | 60                   | 75                     | 15                          | 75                                | 0                           |
| 7  | 46,5                 | 69                     | 22,5                        | 69                                | 0                           |
|    | 61,5                 | 75                     | 13,5                        | 75                                | 0                           |
| 8  | 5,32                 | 6,84                   | 1,52                        | 6,84                              | 0                           |

|    |       |      |       |      |   |
|----|-------|------|-------|------|---|
| 9  | 56,25 | 75   | 18,75 | 75   | 0 |
| 10 | 16    | 39,2 | 23,2  | 39,3 | 0 |

Tabela 10- Caracterização dos Estados das Baterias dos veículos – CE 1.2.

O veículo 3 é o único que apresenta uma diferença entre a energia requerida e a energia final. Verifica-se que este veículo requer um valor absoluto de energia bastante elevado para a duração do seu estacionamento, pelo que, o algoritmo não garante que este deixe o parque com a energia requerida. Contudo, garante que, enquanto estiver estacionado, será carregado praticamente com potência ativa máxima de carregamento da CS que estava alocado. No gráfico da Figura 25, pode-se observar que a potência ativa de carregamento,  $P_{Ch(Ev,t)}$  é igual a 22 kW.

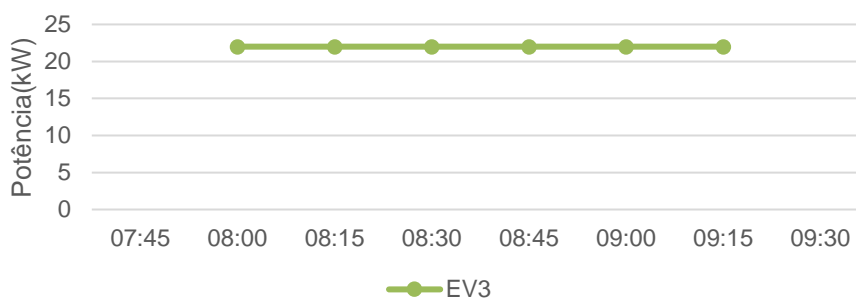


Figura 25 - Potência Ativa de Carregamento do Veículo 3– CE 1.2.

Ainda se pode observar a evolução do estado das baterias de cada veículo pelo diagrama apresentado na Figura 26.

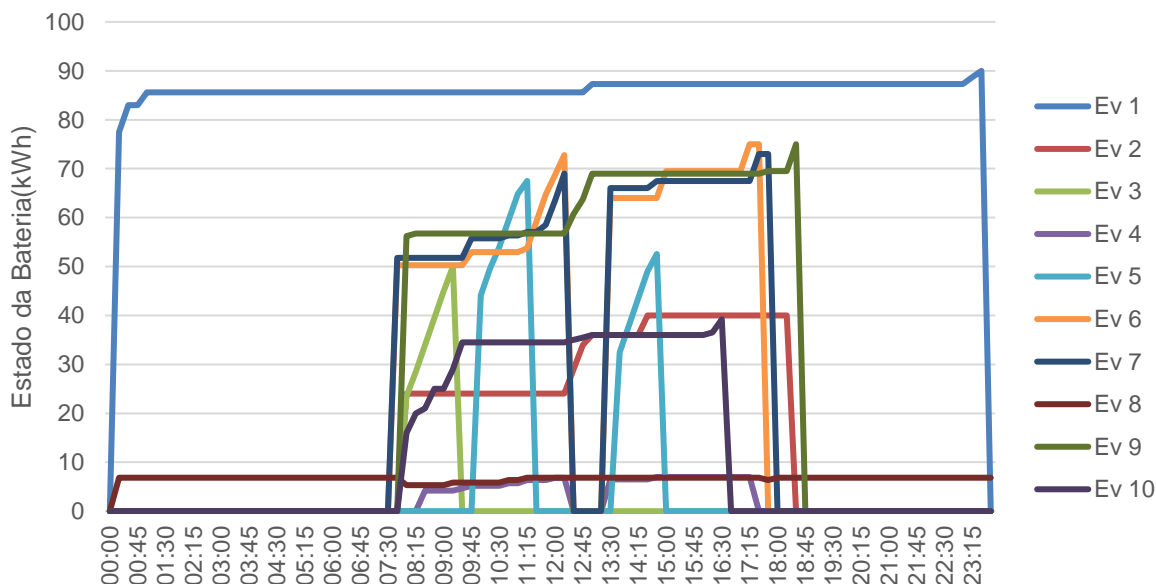


Figura 26-Diagrama da Evolução Temporal do Estado das Baterias– CE 1.2.

De forma a averiguar as vantagens do sistema proposto procedeu-se à comparação dos resultados obtidos pela metodologia proposta com um sistema não controlável, sendo que o segundo não tem

acesso às necessidades dos utilizadores nem defini o local de estacionamento dos veículos. Num sistema não controlável sempre que um veículo é conectado com a rede esta fornece-lhe a potência disponível no parque, respeitando as restrições da potência da CS. Este sistema só interrompe o carregamento dos veículos casos estes atingem a capacidade máxima das baterias ou sejam desconectados com a rede.

Desta forma, considerou-se pertinente considerar o mesmo cenário descrito nesta subseção, mas para o sistema não controlável, tendo obtido os seguintes resultados:

| ID | $SOC_{i(Ev)}$<br>kWh | $SOC_{req(Ev)}$<br>kWh | $\Delta SOC_{1(Ev)}$<br>kWh | $SOC_{(Ev,t_{final(Ev)})}$<br>kWh | $\Delta SOC_{2(Ev)}$<br>kWh |
|----|----------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 72                   | 90                     | 18                          | 90                                | 0                           |
| 2  | 24                   | 40                     | 16                          | 40                                | 0                           |
| 3  | 18                   | 72                     | 54                          | 18                                | 54                          |
| 4  | 4,18                 | 6,84                   | 2,66                        | 7,6                               | - 0,76                      |
|    | 5,55                 | 7,6                    | 2,05                        | 7,6                               | 0                           |
| 5  | 44,1                 | 67,5                   | 23,4                        | 60                                | 7,5                         |
|    | 27                   | 54                     | 27                          | 40,75                             | 13,25                       |
| 6  | 50,25                | 72,75                  | 22,5                        | 75                                | - 2,25                      |
|    | 60                   | 75                     | 15                          | 75                                | 0                           |
| 7  | 46,5                 | 69                     | 22,5                        | 75                                | 6                           |
|    | 61,5                 | 75                     | 13,5                        | 75                                | 0                           |
| 8  | 5,32                 | 6,84                   | 1,52                        | 7,6                               | - 0,76                      |
| 9  | 56,25                | 75                     | 18,75                       | 75                                | 0                           |
| 10 | 16                   | 39,2                   | 23,2                        | 40                                | - 0,8                       |

Tabela 11- Caracterização dos Estados das Baterias dos veículos – Sistema não controlável - CE 1.2.

Tendo em conta os resultados obtidos e pela análise da última coluna da Tabela 11, verifica-se que o veículo 3 e o veículo 5 ficaram com níveis energia bastante abaixo dos requeridos. Destaca-se em particular o veículo 3 que não inicia o carregamento, uma vez que quando chega ao parque existe vários veículos que se encontram a carregar, não havendo potência disponível para o seu carregamento. Enquanto, por sua vez, os veículos 4, 6, 7, 8 e 10 foram carregados acima das necessidades. Assim, torna-se notório que um sistema não controlável não tem uma utilização inteligente e coordenada da potência disponível. Este caso de estudo demonstra importância do controlo da potência e períodos de carregamento.

### 5.2.3. Conclusão dos CEs – “Dia Seguinte”

Os resultados apresentados no caso de estudo CE1.1. revelam que a metodologia “Dia Seguinte” prioriza o carregamento dos veículos que necessitam de mais energia, respeitando as restrições do parque e das estações de carregamento e o algoritmo garante que o veículo com menos energia será sempre carregado.

No caso de estudo CE1.2., para além da metodologia “Dia Seguinte” prevista, foi igualmente comparado com um “Sistema não controlado”, o que permitiu concluir que com o algoritmo proposto é possível satisfazer quase a totalidade dos utilizadores, contrariamente aos resultados obtidos com o sistema não controlado, em que os veículos de períodos de estacionamento curtos são prejudicados. Neste caso de estudo ainda foi demonstrado que a metodologia “Dia Seguinte” dá prioridade aos veículos de curta duração, alocando-lhes a máxima potência ativa disponível uma vez que os restantes apresentam uma maior disponibilidade e flexibilidade de carregamento.

Durante a aplicação dos casos de estudo para esta metodologia, verificou-se ainda que o tempo de execução do algoritmo é bastante elevado, tendo-se testado cenários com mais veículos de forma a analisar a evolução do tempo de execução.

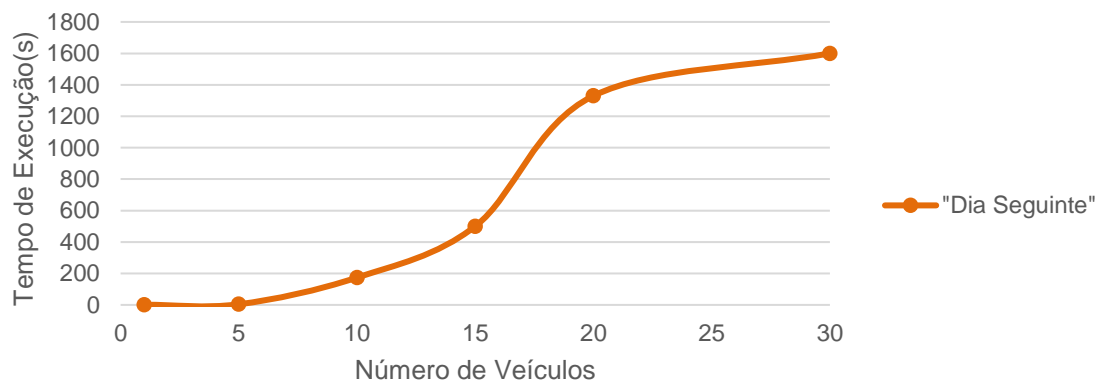


Figura 27 - Tempo de Execução da metodologia “Dia Seguinte” em função dos veículos do problema.

Na Figura 27, é notório o crescimento significativo do tempo de execução à medida que se aumenta o número de veículos do problema. Esta característica da metodologia “Dia Seguinte” levou ao desenvolvimento da metodologia “Duração da Estadia”, com vista a encontrar uma solução com menos custos computacionais e que por sua vez poderá ser executado mais próximo do tempo real.

### 5.3. Metodologia “Duração da Estadia”

Nesta secção apresenta-se o segundo caso de estudo proposto, que pretende testar a metodologia “Duração da Estadia” proposta na secção 3.2.2.

De forma sintética apresentam-se de seguida as características que deverão estar subjacentes à implementação da metodologia seleccionada para o presente caso de estudo, a saber:

- Executa-se uma otimização sempre que um veículo  $Ev$  entra no parque no instante  $t_i$ , sendo que cada otimização inicia no instante  $t_i$  e termina no instante que o último veículo sai do parque,  $t_{lastEv}$ .
- A otimização só tem acesso aos períodos em que os veículos estacionados vão sair do parque de estacionamento, não tendo acesso ao período em que o próximo veículo vai chegar ao parque de estacionamento.
- A função objetivo  $F_{obj}$  tem como principal objetivo minimizar a diferença entre a energia requerida pelo utilizador,  $SOC_{req(Ev)}$ , e a energia com que o veículo deixa o parque de estacionamento,  $SOC_{(Ev,t_{final(Ev)})}$ . Além disso, adicionou-se o objetivo de sempre que possível o carregamento e descarregamento seja contínuo e carregar sempre o veículo com menor carga na bateria, maximizar a variável  $MinSOC_{(t)}$ .
- O método excetua  $N_{Eve}$  otimizações para os períodos  $t \in \{t_i, \dots, t_{lastEv}\}$  em intervalos de 15 minutos,  $T_{duration} = 15 \text{ minutos}$ .

### 5.3.1. CE 2.1 - Parque Empresarial

O presente caso de estudo tem como objetivo testar o nível de satisfação dos utilizadores no final do estacionamento, a forma como o sistema atualiza o escalonamento dos veículos estacionados quando chega um novo veículo ao parque e avalia o impacto que a tecnologia *vehicle-to-grid* tem quando a potência do parque de estacionamento é reduzida.

Para este caso de estudo o cenário previsto considera um parque de estacionamento numa zona empresarial com 10 lugares, equipado com duas CS, e que cada uma têm a responsabilidade de carregar 5 veículos. O perfil dos utilizadores está detalhado na Tabela 9.

|                                 |                                 |
|---------------------------------|---------------------------------|
| <b>Veículos</b>                 | $N_{Ev} = 10$                   |
| <b>Estação de Carregamento</b>  | $N_{CS} = 2$                    |
|                                 | $N_{EvCS} = 5$                  |
|                                 | $P_{CSmax(CS)} = 22 \text{ kW}$ |
| <b>Parque de estacionamento</b> | $P_{ParkMax} = 40 \text{ kW}$   |

*Tabela 12-Characterização do CE 2.1.*

Ao ser aplicado o método do “Duração da Estadia” obtém-se, relativamente à evolução temporal do estado das baterias,  $SOC_{(Ev,t)}$ , o seguinte diagrama:

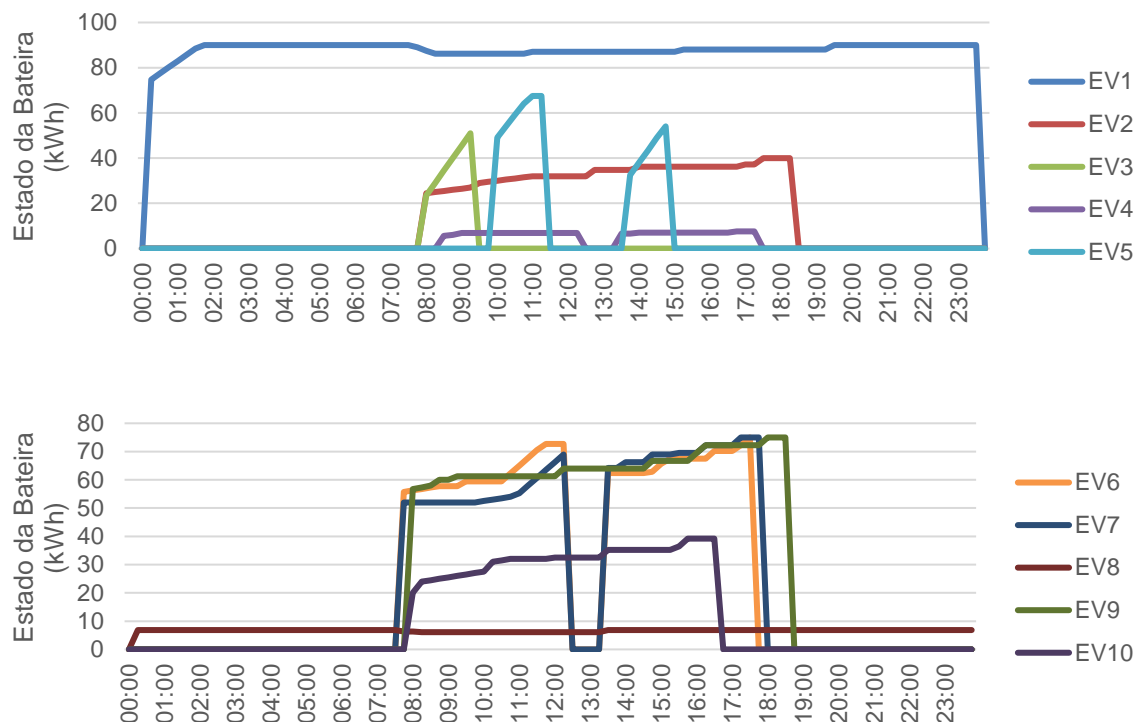


Figura 28 - Diagrama da Evolução Temporal do Estado das Baterias– CE 2.1.

Assim, é possível numa análise global, concluir-se que todos os veículos são carregados, sendo que quase a totalidade deles saíram do parque de estacionamento com a energia requerida, como demonstrado na Tabela 13:

| ID | $SOC_{i(Ev)}$<br>kWh | $SOC_{req(Ev)}$<br>kWh | $\Delta SOC_{1(Ev)}$<br>kWh | $SOC_{(Ev,t_{final(Ev)})}$<br>kWh | $\Delta SOC_{2(Ev)}$<br>kWh |
|----|----------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 72                   | 90                     | 18                          | 90                                | 0                           |
| 2  | 24                   | 40                     | 16                          | 40                                | 0                           |
| 3  | 18                   | 72                     | 54                          | 51                                | 21                          |
| 4  | 4,18                 | 6,84                   | 2,66                        | 7,6                               | 0                           |
|    | 5,55                 | 7,6                    | 2,05                        | 7,6                               | 0                           |
| 5  | 44,1                 | 67,5                   | 23,4                        | 67,5                              | 0                           |
|    | 27                   | 54                     | 27                          | 54                                | 0                           |
| 6  | 50,25                | 72,75                  | 22,5                        | 72,75                             | 0                           |
|    | 60                   | 75                     | 15                          | 75                                | 0                           |
| 7  | 46,5                 | 69                     | 22,5                        | 69                                | 0                           |
|    | 61,5                 | 75                     | 13,5                        | 75                                | 0                           |
| 8  | 5,32                 | 6,84                   | 1,52                        | 6,84                              | 0                           |
| 9  | 56,25                | 75                     | 18,75                       | 75                                | 0                           |



|    |    |      |      |      |   |
|----|----|------|------|------|---|
| 10 | 16 | 39,2 | 23,2 | 39,2 | 0 |
|----|----|------|------|------|---|

Tabela 13-Descrição dos valores do SOC<sub>i</sub>, SOC<sub>req</sub> e SOC<sub>f</sub> de cada EV - CE 2.1.

Considerando a necessidade de uma análise de resultados mais detalhada, face à relevância dos resultados obtidos, entende-se oportuno analisar os veículos que com o menor período de permanência no parque, *Ev 3* e *Ev 5*. Verifica-se que estes veículos estão a ser carregados durante todo o período que estão estacionados, de acordo com o gráfico apresentado na Figura 29. Deste modo, conclui-se que o sistema de gestão de energia dá prioridade a estes dois veículos, uma vez que estes terão um período de estacionamento curto e requerem um elevado valor de energia.

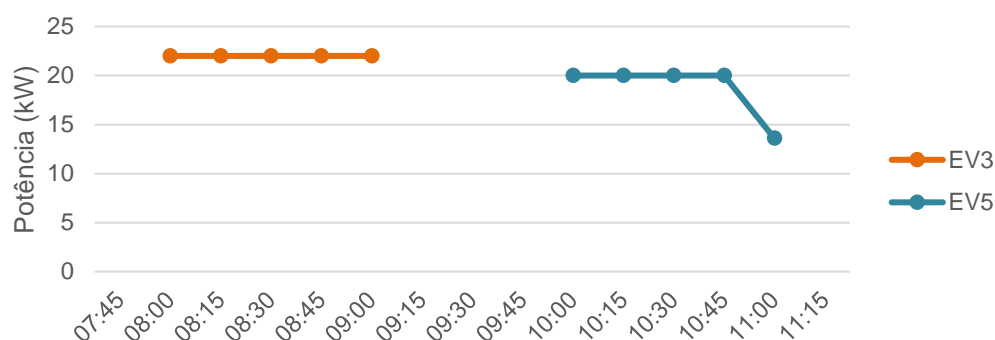


Figura 29 - Evolução Temporal da Potência de Carregamento ao EV 3 e EV 5- CE 2.1.

De facto, é interessante analisar no gráfico da Figura 30 as diferenças entre o escalonamento efetuado às 7h45 quando os veículos *Ev 6* e *Ev 7* entram (o *Ev 3* ainda não está no parque de estacionamento) e o escalonamento efetuado às 8h00 quando o *Ev 3* entra no parque de estacionamento:

- 7h45: o *Ev 6* e *Ev 7* encontram-se estacionados e a necessitar de serem carregados. Respeitando os dois níveis de energia existentes, os veículos são escalonados para carregarem (linhas contínuas a laranja e azul). Estes veículos irão permanecer estacionados até ao 12:15.
- 8h00: o *Ev 3*, veículo com uma duração curta de estacionamento, entra no parque de estacionamento. O algoritmo ajusta o perfil de carga dos *Ev 6* e *Ev 7* (linhas a tracejado laranja e azul) de forma a conseguir fornecer a potência máxima ao *Ev 3* (linha a tracejada a verde) durante todo o seu estacionamento. Segundo este escalonamento, os veículos 6 e 7 retomaram o carregamento quando o *Ev 3* sair do parque.

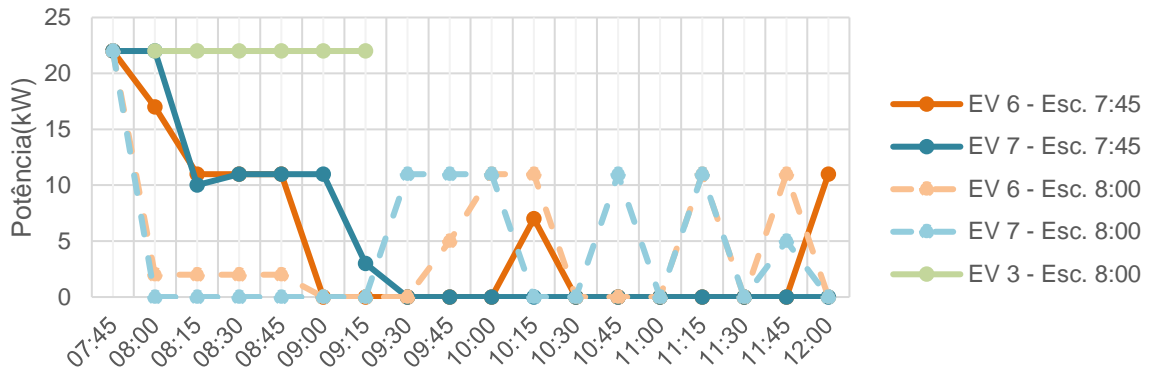


Figura 30- Diagrama da Evolução Temporal da Potência de Carregamento do Escalonamento Efetuado as 7h45 vs 8h00 - CE 2.1.

Outro dado com elevada importância para ser objeto de análise, neste caso de estudo, é o efeito da tecnologia *vehicle-to-grid*. Considerando que a potência ativa do parque de estacionamento,  $P_{ParkMax}$ , está limitada dos 40 kW, e que, assim, as duas CSs de 22 kW não conseguem trabalhar em simultâneo à sua potência ativa máxima,  $P_{CSmax(CS)}$ , o algoritmo, em situações de em que a potência máxima do parque é atingida, utiliza a energia armazenada na bateria dos veículos para fornecer à rede. Assim, e neste caso, os veículos *Ev 1* e *Ev 8*, que às 8h00 já se encontram totalmente carregados e que estarão estacionados o dia todo forneceram a energia necessária, para as duas CSs, *operarem com* a 22 kW, garantindo assim:

- o *Ev 3* carregue à máxima potência durante o seu estacionamento;
- que os outros veículos estacionados e que ainda não atingiram as energias requeridas continuem a carregar neste intervalo de tempo;
- As duas CSs operam à potência ativa máxima.

Deste modo e por forma a ser clarificada a análise na Figura 31 é apresentado a evolução temporal da potência ativa consumida pelo parque de estacionamento,  $P_{total}(t)$ , as potências ativas de carregamento das duas CSs,  $P_{CS(CS,t)}$ , e as potências ativas de descarregamento,  $P_{Dch(Ev,t)}$ , dos veículos 1 e 8. Verifica-se assim, que entre as 7h45 e as 8h45 o parque está a consumir a potência ativa máxima, 40 kW (linha a laranja no gráfico) e que as duas CSs estão ambas a operar a 22 kW de potência ativa (linhas a verde e a vermelho). Esta situação só se torna possível acontecer uma vez que veículos 1 e 8 estão a fornecer energia à rede nesse período.

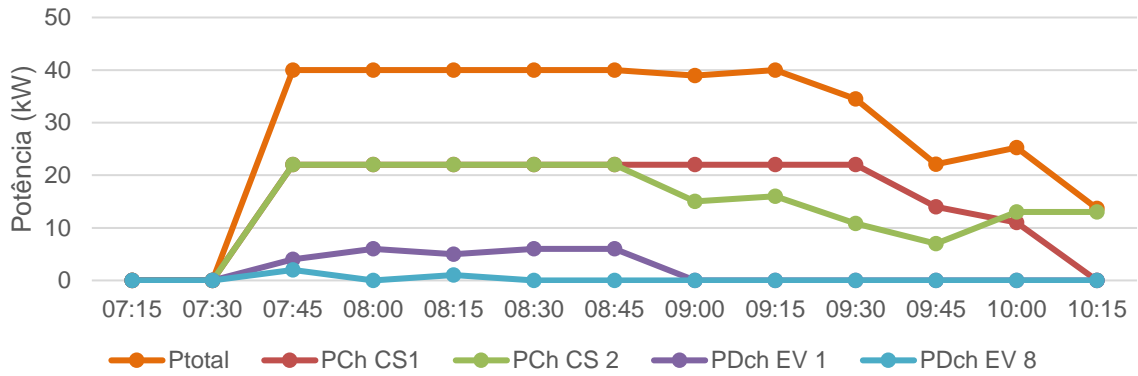


Figura 31 - Diagrama da Evolução Temporal da Potência consumida pelo parque,  $P_{total}$ , da Potência consumida por cada EC e da potência fornecida pelo EV 1- CE 2.1.

A Figura 32, permite representar (a) a evolução temporal do estado da bateria do *Ev 1* e (b) a evolução temporal da potência ativa de carregamento (valores positivos) e da potência ativa de descarregamento (valores negativos) do *Ev 1*. Ambos os diagramas verificam que o sistema de gestão repõe a energia descarregada ao veículo *Ev 1* antes deste sair do parque.

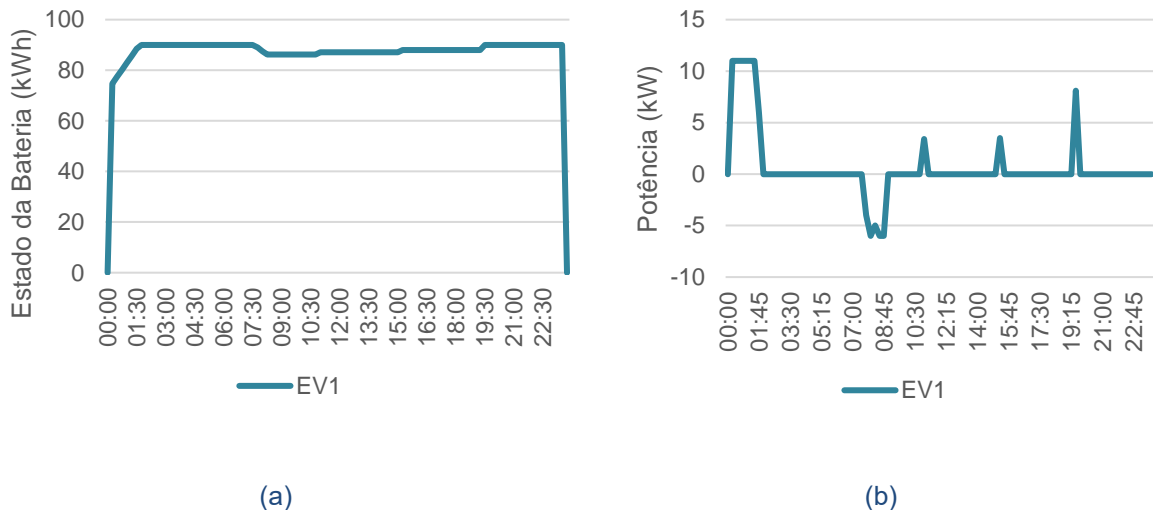


Figura 32 - (a) Diagrama da Evolução Temporal do Estado da Bateria EV 1 (b) Diagrama da Evolução da Potência de Carregamento do EV 1 - CE 2.1.

De forma a complementar o estudo considerou-se relevante inserir uma variação deste parque de estacionamento, com o objetivo de testar e estudar o impacto da tecnologia *vehicle-to-grid* em situações mais extremas, reduzindo a potência ativa máxima de carregamento do parque,  $P_{ParkMax}$ , para 25 kW.

Neste cenário obtém-se os valores apresentados na Tabela 14. Relativamente aos valores da energia quando o veículo sai do parque,  $SOC_{(Ev,t_{final}(Ev))}$ , e à diferença entre a energia requerida e a energia final,  $\Delta SOC_{2(Ev)}$ , que vai determinar a satisfação dos utilizadores:

| ID | $SOC_{i(Ev)}$<br>kWh | $SOC_{req(Ev)}$<br>kWh | $\Delta SOC_{1(Ev)}$<br>kWh | $SOC_{(Ev,t,final(Ev))}$<br>kWh | $\Delta SOC_{2(Ev)}$<br>kWh |
|----|----------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 72                   | 90                     | 18                          | 90                              | 0                           |
| 2  | 24                   | 40                     | 16                          | 40                              | 0                           |
| 3  | 18                   | 72                     | 54                          | 49                              | 23                          |
| 4  | 4,18                 | 6,84                   | 2,66                        | 7,6                             | 0                           |
|    | 5,55                 | 7,6                    | 2,05                        | 7,6                             | 0                           |
| 5  | 44,1                 | 67,5                   | 23,4                        | 67,5                            | 0                           |
|    | 27                   | 54                     | 27                          | 54                              | 0                           |
| 6  | 50,25                | 72,75                  | 22,5                        | 72,75                           | 0                           |
|    | 60                   | 75                     | 15                          | 75                              | 0                           |
| 7  | 46,5                 | 69                     | 22,5                        | 69                              | 0                           |
|    | 61,5                 | 75                     | 13,5                        | 75                              | 0                           |
| 8  | 5,32                 | 6,84                   | 1,52                        | 6,84                            | 0                           |
| 9  | 56,25                | 75                     | 18,75                       | 75                              | 0                           |
| 10 | 16                   | 39,2                   | 23,2                        | 39,2                            | 0                           |

Tabela 14-Descrição dos valores do  $SOC_i$ ,  $SOC_{req}$  e  $SOC_f$  de cada EV - CE 2.1.

Deste modo, torna-se possível verificar que ao reduzir a potência ativa máxima de carregamento do parque, para cerca de metade, somente o veículo *Ev* 3 apresenta um decréscimo no carregamento relativamente ao cenário apresentado anteriormente, contudo a diferença para o cenário anterior é somente de 2 kWh. Na Figura 33, é apresentada a evolução dos estados das baterias de cada veículo,  $SOC_{(Ev,t)}$ .

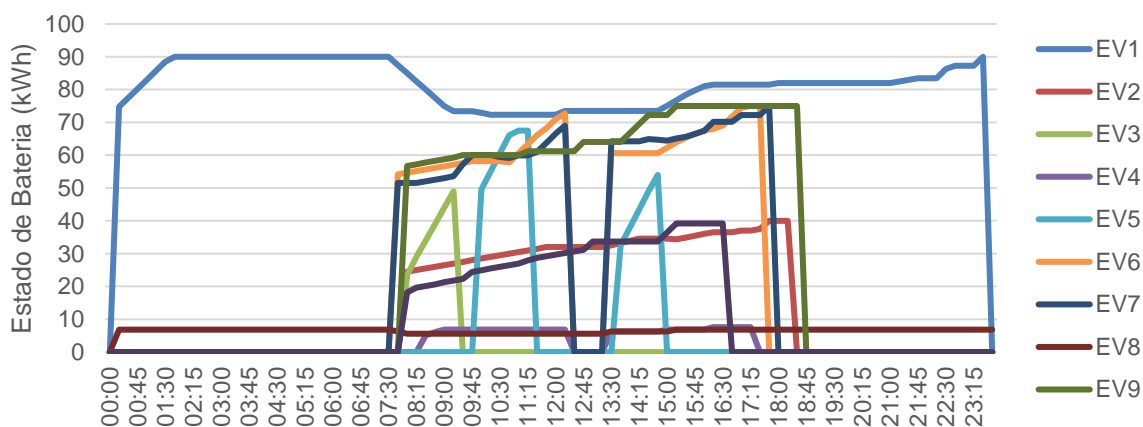


Figura 33 - Diagrama da Evolução Temporal do Estado das Baterias- CE 2.1.

Conclui-se que apesar de ter reduzido quase metade da capacidade do parque, o algoritmo conseguiu satisfazer a maioria dos seus utilizadores e que o impacto da tecnologia *vehicle-to-grid* foi superior

quando comparado com o cenário em que a potência máxima do parque é 40 kW. Desta forma é possível observar na Figura 34 que o algoritmo recorreu com maior frequência e valor à energia armazenada nas baterias nos EVs.

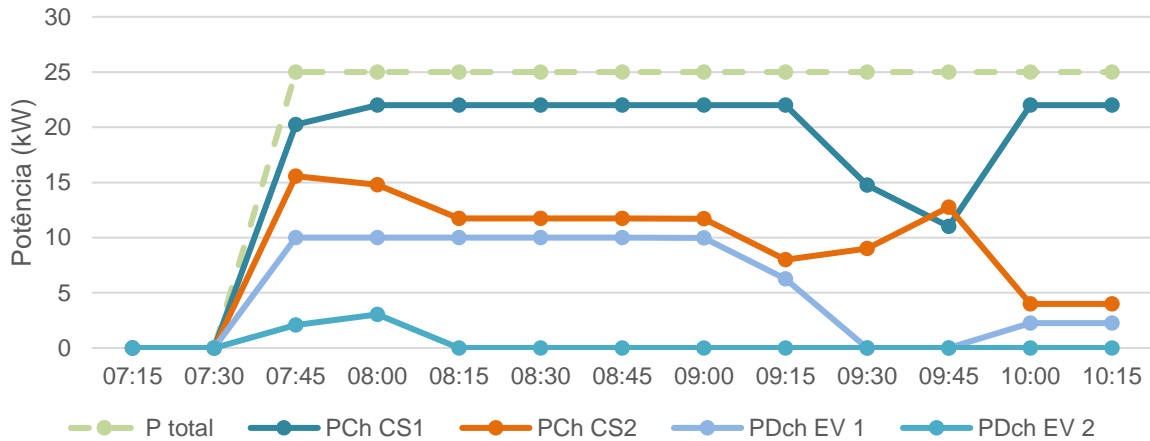


Figura 34-Diagrama da Evolução Temporal da Potência consumida pelo parque,  $P_{total}$ , da Potência consumida por cada EC e da potência fornecida pelo EV 1 - CE 2.1.

Analisando o veículo  $Ev 1$ , é possível representar na Figura 35-(a), a evolução do estado da bateria do veículo e que, comparado com o gráfico da Figura 32-(a), é perceptível que neste caso, a energia armazenada na bateria deste veículo é utilizada em ordens de potências superiores. Já na Figura 35-(b) é representado a evolução da potência de carregamento e de descarga do  $Ev 1$  no qual se verifica, à semelhança do cenário anterior, que a rede repõe a energia requerida à bateria quando for oportuno.

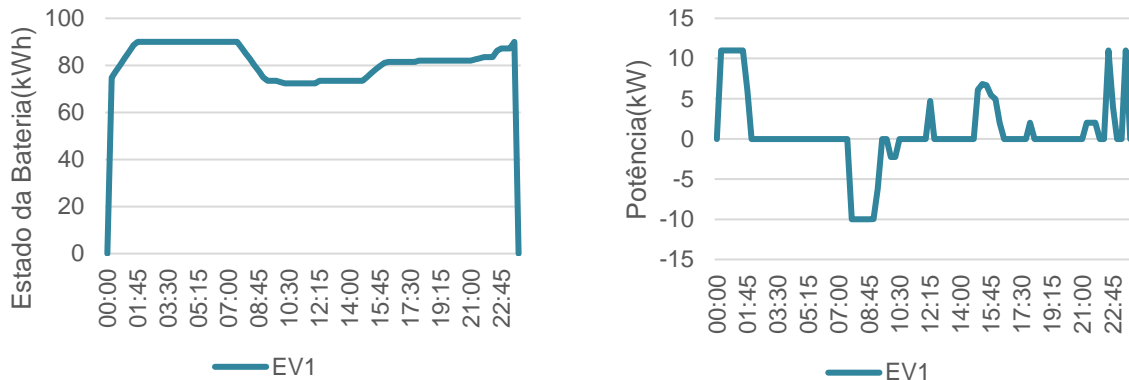


Figura 35 - (a) Diagrama da Evolução Temporal do Estado da Bateria EV 1 (b) Diagrama da Evolução da Potência de Carregamento do EV 1 - CE 2.1.

De seguida, é possível comparar a evolução da potência consumida pelo parque de estacionamento (linhas a traço contínuo) nestes dois casos e a potência proveniente da descarga de EVs que estão estacionados (linhas a tracejado), no gráfico da Figura 36.

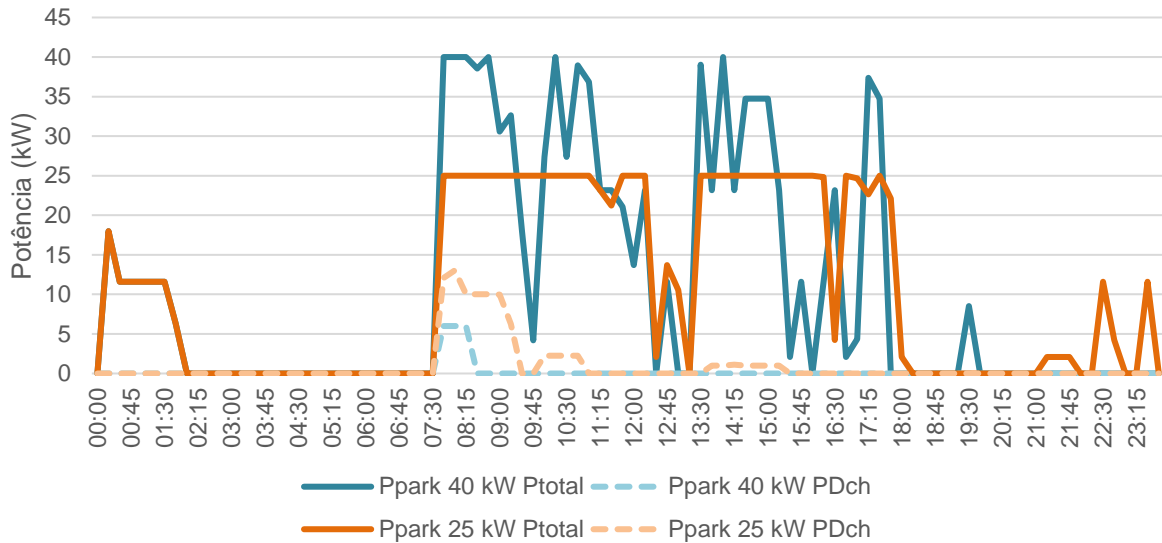


Figura 36- Diagrama temporal da evolução da potência do parque de estacionamento e da potência proveniente das baterias dos EVs - CE 2.1.

Com a análise deste caso de estudo foi demonstrado a forma eficaz como o sistema atualiza o perfil de carregamento dos veículos com a entrada de veículos com diferentes necessidades energéticas. Além disso, foi demonstrado a importância da tecnologia *vehicle-to-grid* para garantir o carregamento de veículos com curta duração de estacionamento e que esta importância aumenta quando as restrições na potência ativa do parque são mais restritas.

### 5.3.2. CE 2.2 - Estacionamento de Veículos

Esta subsecção é dedicada à análise detalhada do processo de estacionamento de veículos, tendo como principal objetivo identificar a estação de carregamento CS o veículo terá que se conectar, definido o valor da variável  $X_{CS(CS)}$ .

Neste caso de estudo, detalhado na Tabela 15, o cenário proposto considera um parque de estacionamento residencial com 3 lugares, equipado com duas CS, e que cada uma têm a responsabilidade de carregar 5 veículos.

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| <b>Veículos</b>                 | $N_{Ev} = 3$   |
| <b>Estação de Carregamento</b>  | $N_{CS} = 2$<br>$N_{EvCS} = 5$<br>$P_{CSmax(CS)} = 7,2 kW$ |
| <b>Parque de estacionamento</b> | $P_{ParkMax} = 15 kW$                                      |

Tabela 15- Caracterização do Cenário 3 - CE 2.2.

Tome-se como exemplo um veículo 1 que chega ao parque as 19h45 e indica que sairá às 21h. O parque de estacionamento encontra-se vazio, sendo que o algoritmo indica que o veículo deve-se

conectar à CS 1 e escalona a potência ativa da CS com a evolução temporal demonstrada do diagrama temporal da Figura 37.

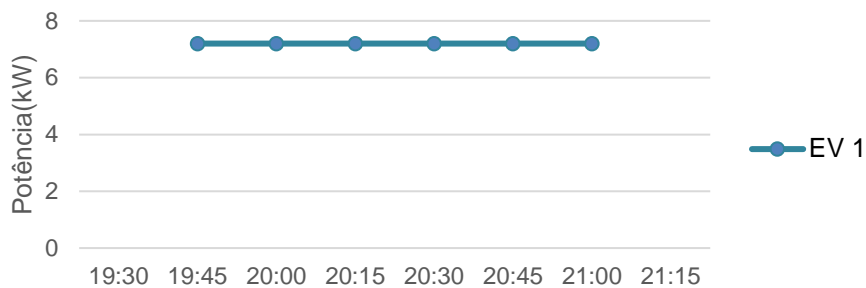


Figura 37 - Escalonamento da potência ativa de carregamento do EV 1 às 9h30 - CE 2.2.

O veículo 2 chega ao parque as 20h, indicando que irá sair do parque às 8h da manhã do dia seguinte. Desta forma, o algoritmo atribui a CS 2 que está completamente livre para o veículo 2 permitindo que os dois veículos agora estacionados possam ser carregados à potência ativa máxima de cada CS. No gráfico da Figura 38, observa-se que ambos os veículos estão escalonados para carregar á potência ativa de 7,2 kW.

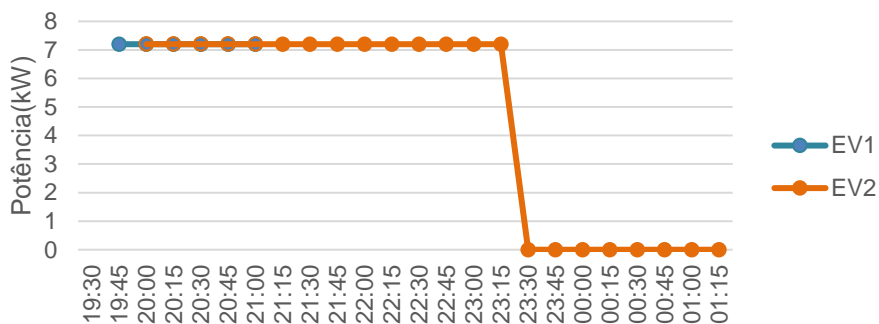


Figura 38-Escalonamento da potência ativa de carregamento do EV 1 e EV 2 às 9h45 - CE 2.2.

O veículo 3 entra no parque as 20h30 e indica que sai as 22h, sendo que as duas CS já têm ambas um veículo ligado. Desta forma o sistema estaciona o veículo 3 na CS 2, carregando os dois veículos que tem menos duração de estacionamento (1 e 3) em CSs distintas, escalonando o carregamento do veículo 2 de forma a priorizar os outros veículos (Figura 39).

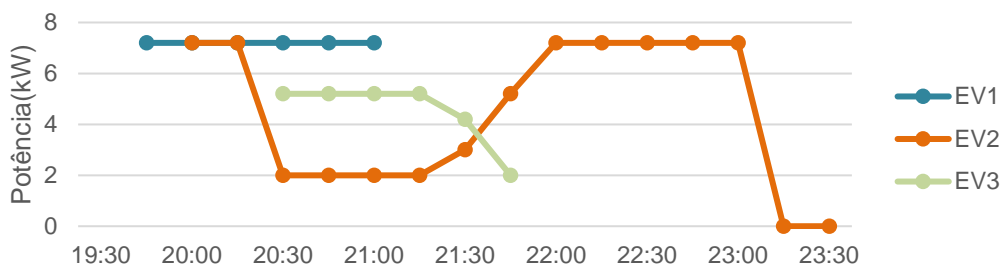


Figura 39- Escalonamento da potência ativa de carregamento do EV 1, EV 2 e EV3 às 10h30 - CE 2.2.

Conclui-se que que caso não fosse efetuada a otimização a alocação do veículo à CS, poderia se dar o caso do utilizador do veículo 3 optar por estacionar na CS 1 e desta forma impossibilitaria o carregamento total de um dos veículos. Assim sendo, o veículo 2 que é o menos prioritário dos três veículos iria ser aquele com maior potência ativa de carregamento, visto que seria o único carro alocado à CS 2. Enquanto isso os veículos 1 e 3 teriam que repartir a potência ativa de carregamento da CS 1 pelos dois veículos, acabando por não conseguir satisfazer ambos (Figura 40).

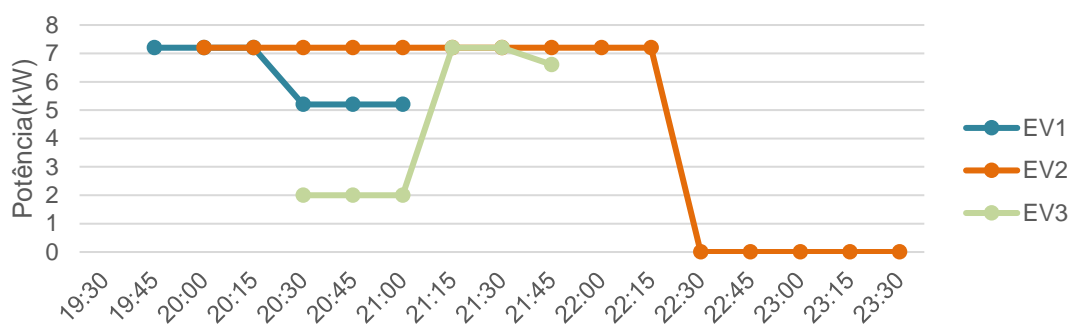


Figura 40- Escalonamento da potência ativa de carregamento do EV 1, EV 2 e EV3 às 10h30 – sem estacionamento - CE 2.2.

### 5.3.3. CE 2.3 - Estudo dos Circuitos

O presente caso de estudo tem como objetivo o estudo da potência ativa percorrida pelos circuitos, sendo que esta é limitada por um valor máximo,  $P_{CirMax(Circuit)}$ , determinado pelo limite térmico do cabo de ligação entre as CSs e pela fonte de energia.

Considera-se para este caso de estudo (CE) um cenário que considera o perfil de utilizadores da subsecção 5.5.3. e que o circuito por onde as estações de carregamento 1 e 2 ligam à rede tem um limite de potência ativa de 7,2 kW (um cabo de cobre com uma secção de 4 mm<sup>2</sup> que suporta 34 A de intensidade de corrente no sistema trifásico [52]). No gráfico da Figura 41, verifica-se que a potência ativa de carregamento das duas CSs respeitam esta regra.



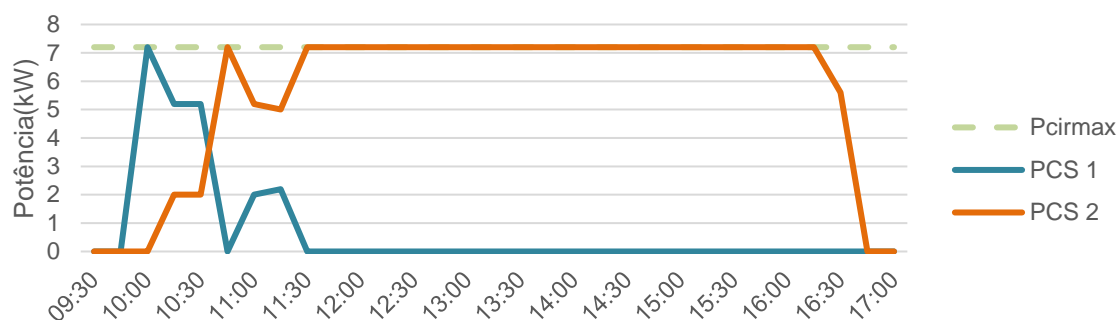


Figura 41 - Evolução da potência ativa de carregamento da CS1 e CS2, respeitando o limite da potência ativa do circuito que estão integradas - CE 2.3.

Na análise dos resultados obtido conclui-se que a metodologia respeita um limite imposto pela potência ativa dos circuitos, embora não seja efetuado qualquer estudo sobre o tipo de condutores instalados em parque de estacionamento, sendo proposto como trabalhos futuros no âmbito das potencialidades desta ferramenta para trabalhos futuros, na seção 6.2.

### 5.3.1. Conclusão dos CEs – “Duração da Estadia”

Os resultados apresentados no caso de estudo CE 2.1. demonstram que a metodologia “Duração da Estadia” atinge o seu principal objetivo maximizar a satisfação dos utilizadores. O sistema executa o escalonamento dos veículos, dando prioridade aqueles que necessitam de ser carregados com mais energia e cujo período de estacionamento é mais reduzido, com vista a atingir o nível de energia requerido pelo utilizador.

Contudo, ainda neste caso de estudo foi analisada a dinâmica do escalonamento dos carregamentos dos veículos sempre que entra um veículo novo no parque. O sistema adapta o perfil de carregamentos dos veículos estacionados as necessidades do novo veículo, de forma a conseguir satisfazer o máximo de utilizadores.

Neste caso de estudo foi igualmente analisado o impacto da tecnologia *vehicle-to-grid*, tendo-se apurado que este mecanismo permite aumentar a capacidade de carregamento do parque e o número de veículos a serem carregados em períodos de maior congestão da rede. Sendo que se verificou que o algoritmo recorre aos veículos já estacionados e cujo a duração de estacionamento é longa, e que repõe a energia fornecida pelo veículo mais tarde em períodos em que menos procura de energia.

Relativamente ao caso de estudo CE 2.2. ficou demonstrado a vantagem em considerar a localização do veículo no parque da responsabilidade do sistema de gestão, face à possibilidade de ser o utilizador o responsável pelo estacionamento do veículo, uma vez que desta forma poderia, poderia causar o incumprimento do carregamento do veículo.

## 5.4. Análise da performance – “Dia Seguinte” vs “Duração da Estadia”

Esta secção é dedicada à análise da performance das duas metodologias propostas para o primeiro nível de otimização, consideraram-se os mesmos cenários para ambas as metodologias cujos resultados estão apresentados e analisados nas secções 5.2 e 5.3, respetivamente. As diferenças entre estas duas abordagens residem na forma como distribuem a potência ativa de carregamento pelos veículos e o tempo para a sua otimização.

### 5.4.1. Diferenças no carregamento de veículos

Esta subsecção é dedicada à análise das diferenças entre o perfil desenhado para o carregamento de cada veículo nas duas metodologias estudadas para o primeiro nível de otimização. Assim, conforme a descrição apresentada na 3.3.2., no método “Duração da Estadia” foi previsto um aumento de restrições e de fatores à função objetivo, em que:

- Prejudicam a função objetivo quando o carregamento de um veículo é interrompido. Desta forma, nas condições perfeitas todos os veículos iniciam o carregamento e só o finalizam quando atingem o nível de energia requerido. O carregamento só será interrompido caso seja permitido que outro veículo com mais prioridade seja carregado. Isto faz com que na metodologia “Duração da Estadia”, o processo de carregamento seja mais contínuo e estável. É possível observar esta diferença nas duas metodologias pela análise da potência ativa de carregamento,  $P_{Ch(Ev,t)}$ , do *Ev* 5 no cenário do parque pendular, apresentados nas secções 5.2.1. e 5.2.2.. Na Figura 42, apresenta-se a evolução temporal da potência ativa de carregamento do *Ev* 5.

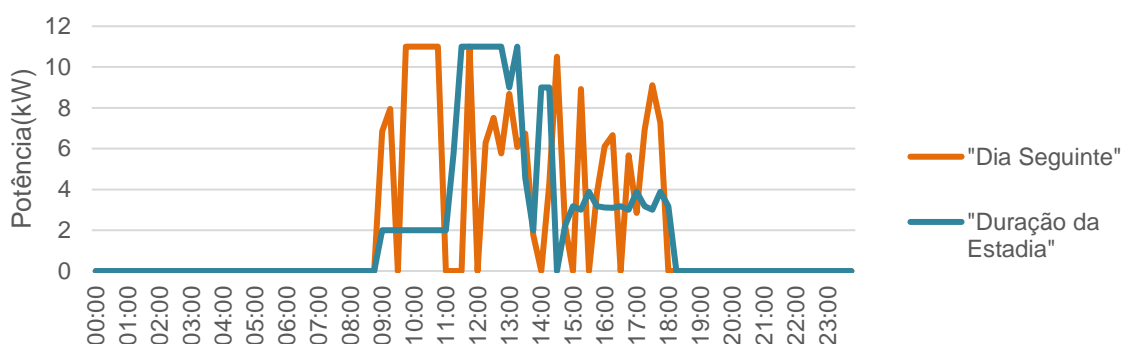


Figura 42 - Gráfico comparativo da potência ativa de carregamento do EV 5 no parque pendular.

- Implementam dois limites distintos de potência ativa de carregamento de forma a obter-se um tempo de carregamento mais realista quando se utiliza estações de carregamento que entregam valores de potência ativa elevados. Pode-se observar a implementação deste nível no gráfico da Figura 43: às 7h45 o *Ev* 6 está com menos de 80% de carga na bateria, o que leva à metodologia “Duração de Estadia” a alocar 22 kW de potência ativa de carregamento. Enquanto entre os 10h30 e 12h, o *Ev* 6 já atingiu os 80%, por isso não é carregado com uma potência ativa de carregamento superior a 11 kW.

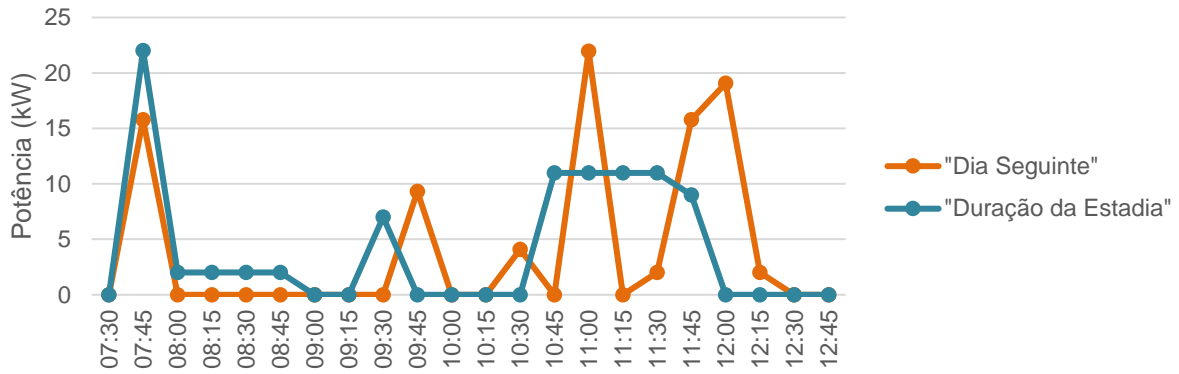


Figura 43 - Gráfico comparativo do perfil desenhado para a potência ativa de carregamento do EV 6 nas metodologias "Dia Seguinte" e "Duração da Estadia".

#### 5.4.2. Tempo de execução da otimização

Relativamente ao tempo de execução verifica-se divergência entre as duas metodologias, que está relacionado com a forma distinta como os dois métodos abordam o problema em termos temporal e processo de alocação dos veículos aos lugares:

- Enquanto na metodologia do "Dia Seguinte" o período de otimização é fixo e tem uma duração de um dia, na "Duração da Estadia" o período da otimização varia consoante o perfil dos utilizadores.
- Por sua vez, na metodologia do "Dia seguinte" o veículo é alocado a um determinado lugar de estacionamento dentro da otimização, ao invés da metodologia da "Duração da Estadia", em que a otimização aloca o veículo a uma estação de carregamento e só em pós-processamento é que lhe é atribuído um lugar com ligação à CS;

As referidas diferenças têm influência na dimensão dos parâmetros e das variáveis. Para este efeito é analisado um caso de estudo simples demonstrativo deste fenómeno, em que todos os veículos entram no parque de estacionamento às 8h e a saem às 17h, tendo a simulação uma duração,  $T_{Duration}$ , de 15 minutos.

Neste caso foi considerado um parque de estacionamento com capacidade para 25 veículos equipado com 5 estações de carregamento que conectam com 5 lugares cada uma, deste modo verifica-se o seguinte:

- Na metodologia "Dia seguinte" a variável tempo terá assumirá valores entre 1 e 96, correspondentes às 24h de um dia, enquanto no "Duração da Estadia" assumirá valores entre 1 e 33, que corresponde à duração do estacionamento.
- Os parâmetros e variáveis responsáveis pela alocação do veículo a um lugar/CS a diferença nas dimensões também é notória: no "Dia Seguinte" tem-se  $X_{(Place, Ev, t)}$  sendo que neste tem dimensões  $25 \times Ev \times 96$ , responsável por definir o lugar de cada veículo durante o dia; no

“Duração da Estadia” tem-se que  $X_{CS(CS)}$  de dimensões  $1 \times 5$ , responsável por atribuir um CS a um veículo no instante em que este entra no parque.

Desta forma, o método “Dia seguinte” tem um tempo de execução muito superior ao método “Duração da Estadia”, no gráfico da Figura 44 apresenta-se o tempo de execução de cada metodologia em função do número de veículos do problema:

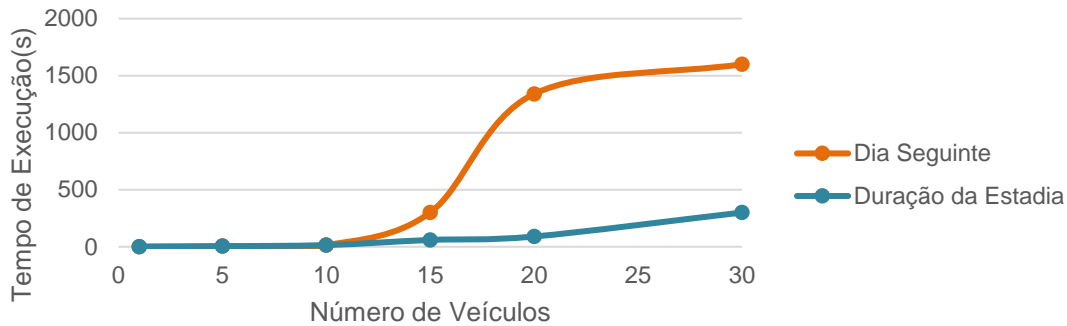


Figura 44 - Evolução do tempo de execução da otimização em função o número de veículos.

### 5.4.3. Conclusão

Como resultado da análise das duas metodologias, conclui-se que atingem o principal objetivo com igual sucesso, isto é maximizar a satisfação dos utilizadores e demonstrem claras melhorias em comparação com um sistema de carregamento não controlável. Contudo, foi possível verificar que a metodologia “Dia Seguinte” torna-se insustentável para questões que envolvam o número de veículos superior a 15. Reforça-se o facto de ser eficaz quando aplicada a parque de estacionamento com dimensões mais reduzidas.

Além disso, a metodologia “Dia Seguinte” não inclui restrições que garantam um carregamento contínuo dos veículos nem diferentes limites de potências ativas de carregamento consoante o estado da bateria, motivo pelo qual poderá o qual poderá prejudicar para as baterias com o escalonamento realizado.

Desta medida, decidiu-se seleccionar a metodologia “Duração da Estadia” para a implementação do sistema de gestão hierárquico, o qual é apresentada sua testagem na seção seguinte.

## 5.5. Sistema Hierárquico

Esta secção é dedicada ao terceiro e último caso de estudo, que consiste na implementação do sistema de gestão hierárquico final, proposto nesta dissertação de mestrado.

Este sistema de gestão é composto por dois níveis de otimização, em que no primeiro nível encontra-se o operador principal, que sempre que um novo veículo entra no parque, dimensiona o perfil de carregamento para todos os veículos, em períodos de 15 minutos e aloca o novo veículo a uma CS. No que diz respeito ao segundo nível, situado nos operadores locais de cada CS, tem como principal

objetivo otimizar a potência fornecida por cada CS a cada minuto, reduzindo assim o tempo de carregamento de cada veículo.

Nas subsecções que se seguem, pretende-se avaliar a conectividade e a comunicação, entre o primeiro nível e o segundo nível, a performance do sistema final para um parque empresarial e comparar com um sistema não controlável. Por último, na secção 5.5.3. é avaliada a performance do sistema final proposto para parques de estacionamento de elevada escala.

### 5.5.1. CE 3.1 - Parque Empresarial

Nesta subsecção, pretende-se testar a metodologia final para o cenário descrito na secção 5.2.1., parque empresarial, em que a potência ativa máxima do parque,  $P_{ParkMax}$ , esta limitada a 25 kW. O objetivo deste caso de estudo é demonstrar as vantagens de utilizar o segundo nível de otimização e apresentar a dinâmica de conectividade entre o primeiro nível e o segundo nível de otimização. Na Tabela 16, são apresentados os parâmetros gerais do parque de estacionamento.

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| <b>Veículos</b>                 | $N_{Ev} = 10$   |
| <b>Estação de Carregamento</b>  | $N_{CS} = 2$<br>$N_{EvCS} = 5$<br>$P_{CSmax(CS)} = 22 \text{ kW}$ |
| <b>Parque de estacionamento</b> | $P_{ParkMax} = 25 \text{ kW}$                                     |

*Tabela 16-Characterização do CE 3.1.*

Nesta avaliação inicia-se por apresentar a performance do sistema de gestão hierárquico para o cenário proposta. De seguida, analisa-se o perfil de carregamento e descarregamento de alguns veículos em períodos do dia específicos de forma a permitir demonstrar, que o segundo nível otimiza o perfil de carregamento de cada veículo em cada minuto de forma a reduzir o seu tempo de carregamento e que o segundo nível respeita os períodos e os valores da potência ativa de descarga definidos pelo primeiro nível.

Na Tabela 17, são apresentados os valores relativos ao estado das baterias dos veículos,  $SOC_i(Ev)$ ,  $SOC_{req}(Ev)$ ,  $SOC_{Ev.Tfinal(Ev)}$ , e o horário em que os veículos atingem o nível de energia, com que saem do parque de estacionamento. Importa referir que, se por um lado, a variável  $t_{chEnd1(Ev)}$  indica a hora em que o veículo  $Ev$  atinge o nível de energia requerido, utilizado somente o primeiro nível de otimização, por outro lado, a variável  $t_{chEnd2(Ev)}$ , indica o mesmo acontecimento, mas para o sistema hierárquico com os dois níveis de otimização a funcionar.

| ID | $SOC_{i(Ev)}$<br>kWh | $SOC_{req(Ev)}$<br>kWh | $\Delta SOC_{1(Ev)}$<br>kWh | $SOC_{(Ev,t_{final(Ev)})}$<br>kWh | $\Delta SOC_{2(Ev)}$<br>kWh | $t_{chEnd1(Ev)}$ | $t_{chEnd2(Ev)}$ |
|----|----------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------|
| 1  | 72                   | 90                     | 18                          | 90                                | 0                           | 23:45            | 16:48            |
| 2  | 24                   | 40                     | 16                          | 40                                | 0                           | 18:15            | 15:53            |
| 3  | 18                   | 72                     | 54                          | 51                                | 21                          | 9:15             | 9:15             |
| 4  | 4,18                 | 6,84                   | 2,66                        | 7,6                               | 0                           | 12:15            | 12:15            |
|    | 5,55                 | 7,6                    | 2,05                        | 7,6                               | 0                           | 15:45            | 15:45            |
| 5  | 44,1                 | 67,5                   | 23,4                        | 67,5                              | 0                           | 11:15            | 11:08            |
|    | 27                   | 54                     | 27                          | 54                                | 0                           | 15:00            | 15:00            |
| 6  | 50,25                | 72,75                  | 22,5                        | 72,75                             | 0                           | 12:15            | 12:15            |
|    | 60                   | 75                     | 15                          | 75                                | 0                           | 18:30            | 16:25            |
| 7  | 46,5                 | 69                     | 22,5                        | 69                                | 0                           | 12:15            | 12:15            |
|    | 61,5                 | 75                     | 13,5                        | 75                                | 0                           | 17:45            | 17:07            |
| 8  | 5,32                 | 6,84                   | 1,52                        | 6,84                              | 0                           | 00:00            | 16:02            |
| 9  | 56,25                | 75                     | 18,75                       | 75                                | 0                           | 18:30            | 15:38            |
| 10 | 16                   | 39,2                   | 23,2                        | 39,2                              | 0                           | 16:15            | 16:01            |

Tabela 17-Descrição dos valores do  $SOC_i$ ,  $SOC_{req}$  e  $SOC_f$  de cada EV - CE 3.1.

Torna-se possível concluir que com a implementação do segundo nível, aumenta-se a potência ativa de carregamento de cada CS em cada minuto, diminuindo assim o tempo de carregamento de cada veículo. Observando o exemplo do veículo 2 na Tabela 17, na coluna da  $T_{chEnd1(Ev)}$  em que é indicado que o primeiro nível escalonou o fim do seu carregamento para as 18:15, e por sua vez, na coluna da variável  $T_{chEnd2(Ev)}$  é apresentado a hora real do terminou o carregamento, sendo às 15:53. Desta forma, permite que o parque de estacionamento aumente o valor da potência ativa disponível para permitir carregar eventuais novos veículos.

Este aspeto assume maior relevância, no caso da metodologia “Duração da Estadia” no primeiro nível de otimização, uma vez que o sistema não tem acesso às informações relativas aos próximos veículos a entrar no parque, permitindo assim aumentar a sua capacidade, em receber novos veículos.

Este decréscimo de tempo de carregamento também pode ser analisado por comparação do diagrama da evolução temporal da potência ativa do parque nos dois níveis de controlo (Figura 45). Deste modo, e por forma a obter os valores da potência ativa no segundo nível é determinada média aritmética dos minutos pertencente a cada intervalo de 15 minutos.

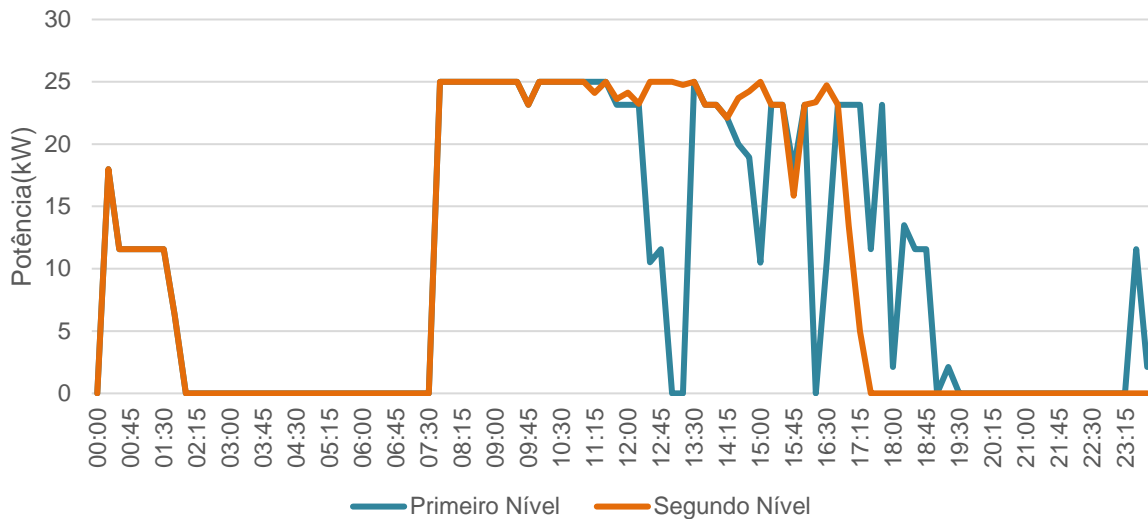


Figura 45 - Diagrama da evolução da potência consumida pelo parque CE 3.1.

### 5.5.2. CE 3.2 - Interligação entre os níveis de otimização

De seguida, é efetuado o estudo da ligação entre o primeiro nível de otimização e o segundo nível. Esta análise é iniciada pelo estudo do comportamento dos veículos que estão em descarga e a dinâmica entre os dois níveis dos veículos que estão em carregamento. Por último, é analisado o caso particular, em que o segundo nível não recebe permissão do primeiro nível para avançar com os valores de potências ativas de carregamento, obtidos na sua otimização.

Como descrito detalhadamente na seção 3.3.2., o segundo nível de otimização está dimensionado para respeitar as decisões do primeiro nível em relação aos períodos de descarga e aos valores das potências ativas associadas à mesma.

Neste cenário, o primeiro nível de otimização escalonou o *Ev 1* para ser descarregado a uma potência ativa de descarga de 10 kW no período entre as 8h e as 8h15. Desta forma, a cada minuto deste intervalo de tempo, o segundo nível de otimização terá de igualar este valor de descarga. Esta situação pode ser comprovada no gráfico da Figura 46, o qual representa o valor da potência ativa de descarga do *Ev 1* atribuída pelo segundo nível para cada minuto:

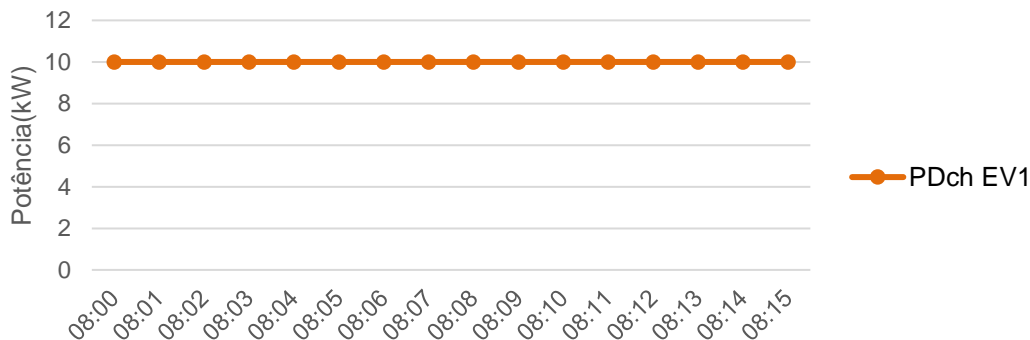


Figura 46- Potência ativa de descarga do EV 1 atribuída pelo segundo nível de otimização - CE 3.2.

Por sua vez, e como foi igualmente explicado na seção 3.3.2., quando se trata da potência ativa de carregamento, o segundo nível de otimização tem a liberdade de aumentar as potências ativas de carregamento e antecipar o carregamento de veículos, sem nunca prejudicar os veículos com carregamento já escalonado. O facto do segundo nível poder aumentar a potência ativa de carregamento e antecipar o carregamento de veículo, juntamente com o facto de funcionar em tempo-real, permite diminuir o tempo de carregamento dos veículos.

Tome-se o exemplo do veículo *Ev 5*, em que no primeiro nível de otimização alocado, entre as 10h45 e as 11h, um valor para a potência de carregamento de cerca de 8 kW. O segundo nível de otimização conseguiu aumentar este valor nos instantes entre as 10h45 e as 10h54, para 13 kW. Assim, o veículo acabou o processo de carregamento em cerca de 5 minutos mais cedo do previsto pelo primeiro nível.

No gráfico apresentado na Figura 47, observa-se que o segundo nível alocou a mesma potência de carregamento atribuída pelo primeiro nível, e quando houve oportunidade para aumentar, às 10h45, o segundo nível fê-lo.

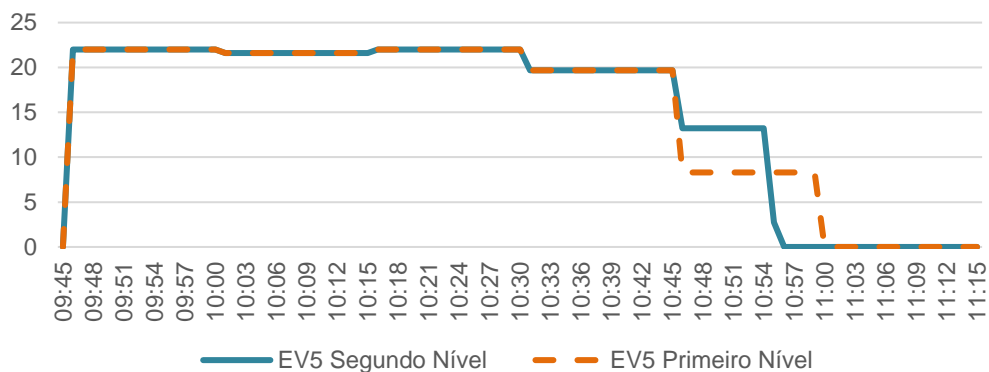


Figura 47-Potência ativa de descarga do EV 5 atribuída pelo segundo nível de otimização - CE 3.2.

De forma a ser garantido que o segundo nível de otimização respeita as regras do parque, nomeadamente a potência instalada do parque,  $P_{ParkMax}$ , e a potência máxima de cada circuito,  $P_{CircuitMax}$ , o segundo nível de otimização envia potências ativas de cada CS para o operador principal e este autoriza, ou não, a sua implementação, como referido na subseção 3.3.3.

De forma a exemplificar o funcionamento do mecanismo de coordenação, tome-se o exemplo de duas CSs em que o operador principal (primeiro nível) alocou para a CS 1 uma potência ativa de carregamento 22 kW e uma potência ativa de carregamento de 10kW para a CS 2, no período compreendido entre as 9h e as 9h15. Os operadores locais situados em cada CS maximizam a potência de carregamento dos seus veículos com vista a verificar um decréscimo entre a energia armazenada e a energia requerida para sair do parque a cada minuto. Tendo em conta esta situação podemos considerar dois cenários possíveis, os quais se descrevem da seguinte forma:

- Se a potência do parque instalada no parque for superior a 44 kW, o operador principal irá autorizar a CS 2, a aumentar a potência ativa de carregamento para os veículos alocados à mesma;



- Se a potência instalada no parque for inferior a 44 kW, ou seja, as duas CS não poderão operar a potência máxima de carregamento, o operador principal não permitirá que a CS 2 carregue os veículos a uma potência de 22 kW. Neste caso existem duas hipóteses:
  - Se a potência instalada no parque for 32 kW, o operador principal envia para os operadores locais os valores a ser utilizados, ou seja, 22 kW e 10 kW, respetivamente;
  - Se a potência for 38 kW, por exemplo, o operador principal envia para a CS 1 os 22 kW e para a CS 2 aloca os 10 kW conjugados com os o restante 6 kW disponíveis no parque.

### 5.5.3. CE 3.3 - Correções em tempo real

Esta subsecção é dedicada à apresentação de um caso de estudo com o objetivo de demonstrar a capacidade que o segundo nível de otimização tem em efetuar correções em tempo-real (ex. veículo mal conectado com a rede, utilizador chegou ao parque com menos energia do que a comunicada ao sistema, utilizador que saiu mais cedo que o previsto).

Neste caso, foi considerado um cenário em que um utilizador deixa o parque de estacionamento 15 minutos mais cedo que o previsto. Sabendo que o primeiro nível escalonou o perfil de carregamento de todos os veículos considerando a hora de saída prevista inicialmente.

De seguida, na Figura 48, apresenta-se o perfil de carregamento escalonado pelo primeiro nível para os dois veículos estacionados e a evolução do estado da bateria dos veículos:

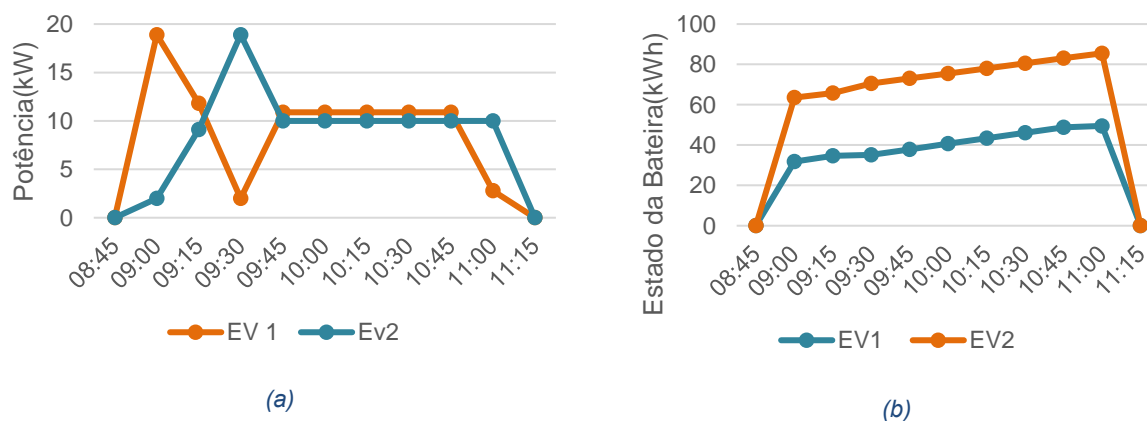


Figura 48 – (a) Diagrama do escalonamento da potência ativa de carregamento dos EVs 1 e 2 (b) Diagrama temporal estado das baterias dos EVs 1 e 2 - CE 3.3.

De seguida, e no sentido de dar resposta à questão da correção do tempo efetivo de permanência dos veículos no parque de estacionamento, foi introduzida a questão do veículo 2 saiu mais cedo do que a hora prevista inicialmente.

Neste caso, resulta que o segundo nível aloca a energia que estava prevista para o veículo 2 no veículo 1 e, este por sua vez termina o seu carregamento mais cedo do que a hora prevista. De acordo com a Figura 49 constata-se que às 10h30, o veículo 2, deixa o parque de estacionamento e o segundo nível aloca a potência disponível ao veículo 1, sendo que este acaba por atingir o nível requerido mais cedo

do previsto. Para a elaboração deste gráfico, os valores da potência ativa no segundo nível foram obtidos através da média aritmética dos minutos pertencente a cada intervalo de 15 minutos.

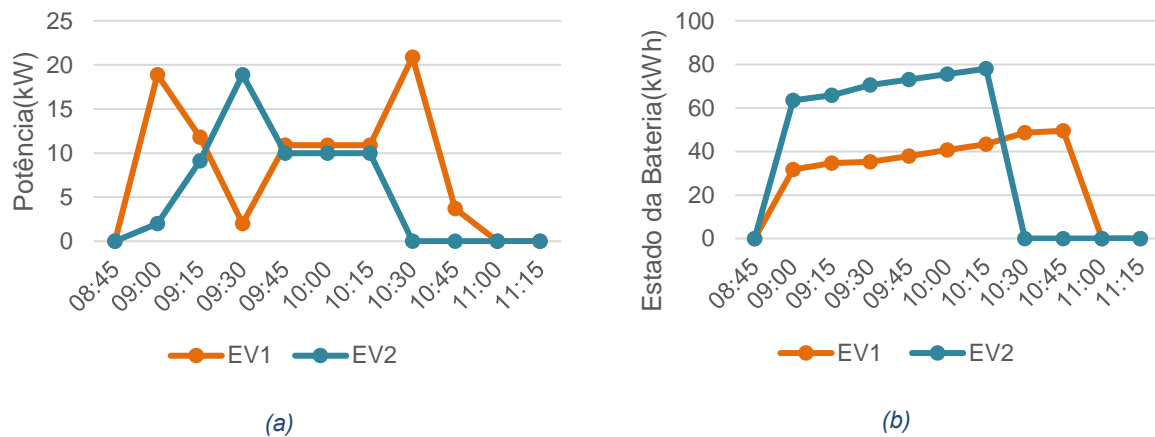


Figura 49- (a) Diagrama da evolução temporal potência ativa de carregamento dos EVs 1 e 2 (b) Diagrama temporal da evolução do estado das baterias dos EVs 1 e 2 - CE 3.3.

#### 5.5.4. CE 3.3 – Parque empresarial de 50 EVs

Este caso de estudo tem como objetivo demonstrar o funcionamento do sistema hierárquico para um parque de estacionamento com capacidade para 50 veículos e comparar a sua performance com um sistema não controlável.

O parque definido para este caso de estudo está localizado numa zona empresarial e equipado com CSs de 11 kW. A capacidade total instalada no parque,  $P_{parkMax}$ , é de 100 kW. Na Figura 50 apresenta-se a evolução da potência ativa do parque para os dois sistemas em estudo nesta subsecção.



Figura 50 - Diagrama temporal da potência ativa total consumida pelo parque.

A distribuição da potência ao longo do tempo é idêntica nos dois sistemas, sendo que ambos respeitam o limite do parque. De notar que o sistema não controlado acaba por utilizar mais energia, uma vez que não tem acesso às necessidades dos utilizadores e só termina o carregamento quando os veículos estão totalmente carregados ou saem do parque. As divergências nos resultados estão relacionadas com a distribuição da potência pelos veículos estacionados, sendo que se verificou:

- No sistema hierárquico final 100 % dos utilizadores saíram satisfeitos do parque.
- No sistema não controlável cerca de 20 % dos utilizadores saíram do parque com menos energia do que a requerida. Estes veículos correspondem na sua maioria aos utilizadores classificados como visitantes, ou seja, veículos que permanecem menos de duas horas e meia no parque. Os veículos que permanecem longos períodos de tempo, são beneficiados e saem do parque com a bateria totalmente carregada.
- Outro aspeto importante é que o sistema não controlável utiliza mais energia e acaba por satisfazer menos utilizadores.

Neste caso de estudo, demonstrou-se o funcionamento do sistema hierárquico para um parque de estacionamento de maiores dimensões e que este cumpre o principal objetivo: satisfazer os utilizadores. Ainda se comparou a performance do mesmo com um sistema não controlável, tendo concluído que em parque de maiores dimensões, o uso descoordenado e não inteligente da potência disponível irá causar transtorno aos utilizadores que permanecem pouco tempo no parque. Além disso, ficou demonstrado que o sistema hierárquico, ao saber as necessidades dos utilizadores, utiliza a potência disponível de forma mais eficiente. Assim, este sistema hierárquico requer uma capacidade energética menor que um sistema não controlado.

#### **5.5.5. Conclusão dos CEs – Sistema Hierárquico**

No estudo do sistema final foram demonstrados os benefícios da implementação de um segundo nível de otimização que permite diminuir o tempo de carregamento dos veículos, continuando a satisfazer os utilizadores. Com isto, provou-se que um sistema hierárquico consegue otimizar a satisfação dos utilizadores e maximizar o uso da potência de todas as CSs, não aumentando o custo computacional.

De seguida, foi demonstrado o sistema de interligação entre os dois níveis. De facto, um sistema hierárquico, em que o segundo nível está situado em cada uma das CSs, exige que haja uma comunicação constante de forma a respeitar as regras do parque.

Ainda foi demonstrado a vantagem de usar um modelo híbrido na linha temporal: o primeiro nível executa o escalonamento a longo prazo, enquanto o segundo nível opera em tempo-real. Desta forma, é possível ajustar o escalonamento dos veículos aos acontecimentos reais, caso o comportamento dos utilizadores não vá de encontro às previsões.

## 6. Conclusão e Trabalho Futuro

Neste capítulo pretende-se apresentar as conclusões do estudo efetuado nesta dissertação. Inicialmente, na secção 6.1, são identificadas as contribuições e conclusões e, posteriormente, na secção 6.2, são apresentados os tópicos que poderão servir de base para a continuação e desenvolvimento do presente estudo.

### 6.1. Conclusões

Esta dissertação contribui para o estado da arte através do desenvolvimento de uma metodologia, para o controlo de gestão de parques de estacionamento, através de um sistema hierárquico que inclui a gestão logística do parque. Dada a pertinência e atualidade do tópico, pode-se considerar que os modelos apresentados nesta dissertação poderão ter um impacto importante ao nível industrial.

O sistema proposto é constituído por dois níveis hierárquicos, em que o primeiro nível será responsável pelo estacionamento dos veículos e garantir que estes saem do parque de estacionamento com a energia requerida, enquanto o segundo nível será responsável pela maximização da potência ativa de carregamento de cada CS em cada minuto.

Os dois níveis de otimização têm restrições atribuídas pelos limites das potências ativas entregues pelos carregadores e pela própria rede de energia. Contudo, diferem entre si pela linha temporal, sendo que o primeiro nível faz um escalonamento do perfil de carregamento dos veículos a considerando as necessidades temporais (máximo de um dia) e o segundo nível opera em tempo real.

Durante o estudo foram desenvolvidas, através da formalização matemática dos equipamentos (Capítulo 3), duas metodologias para a implementação do primeiro nível de otimização designadas por “Dia Seguinte” e “Duração da Estadia”.

No que diz respeito à metodologia “Dia Seguinte” foram aplicados dois casos de estudo, tendo-se verificado que a metodologia permite garantir o nível de satisfação dos utilizadores e definir prioridades tendo em consideração a energia pedida, bem como duração temporal no parque de estacionamento. A presente metodologia apresenta limitações ao nível do tempo de execução da otimização, pelo que são identificadas questões relacionadas com a operação em parques de estacionamento com uma capacidade superior a 15 veículos, tornando-se insustentável a sua implementação. Para além disso, esta metodologia não possui mecanismos que garantam a possibilidade de efetuar um perfil de carregamento dos veículos, sempre que possível.

Em relação à segunda metodologia proposta para o primeiro nível de otimização designada por “Duração da Estadia”, esta permite a atualização dos escalonamentos dos veículos estacionados sempre que um veículo entra do parque de estacionamento, atribuindo-lhe uma CS e um perfil de carregamento para o veículo que entrou no parque nesse instante. Através da aplicação de diferentes cenários o impacto que a tecnologia *vehicle-to-grid* tem no escalonamento dos carregamentos, tendo sido verificado que, em situações em que o parque opera no limite da potência máxima, esta solução permite que seja assegurada o carregamento dos veículos considerados prioritários.

Ainda sobre esta temática, foi apresentado um caso demonstrativo, que permitiu aferir as vantagens em ser considerado a localização do veículo, ou seja, a referenciação da CS a que o veículo está ligado, como uma variável do problema de otimização, permitindo assim, que a disponibilização da potência disponível seja efetuada de uma forma mais eficiente.

Através da aplicação de diversos casos de estudo, revelou-se que a integração de um segundo nível de otimização permite diminuir o tempo de carregamento de cada veículo, respeitando as regras do parque, sem aumentar a complexidade computacional do problema. Com a implementação do segundo nível, garante-se uma melhor utilização da potência disponível e permite ainda fazer correções ao escalonamento do primeiro nível, caso um veículo sai mais cedo que o previsto ou chegue ao parque com menos energia do que o previsto inicialmente.

Em suma o segundo nível tem o principal objetivo corrigir as alterações que eventualmente possam surgir, durante o processo, sobre informações variáveis fornecidas pelos utilizadores.

Verificou-se ainda que a utilização da tecnologia *vehicle-to-grid* no sistema de gestão de energia hierárquico obtém resultados bastante satisfatórios, garantindo assim que os veículos atingem a energia requerida. Em conclusão importa ainda referir que no sistema híbrido com dois níveis de otimização permite garantir que ao utilizador obter a energia requerida durante a permanência no estacionamento e que as CSs operam com a potência máxima, sempre que possível.

## 6.2. Trabalho Futuro

Apesar das contribuições que a presente dissertação propõe sobre o tema, considera-se ainda existirem diversas oportunidades para a continuidade da investigação no âmbito deste estudo.

Numa primeira fase, seria interessante a aplicação do presente sistema a parque de estacionamento já existentes de forma a avaliar a sua performance. De seguida, seria oportuno avaliar a otimização do sistema ao nível computacional para diminuir o tempo de execução das otimizações e avaliar a utilização de outros *softwares* de otimização. Outro aspeto que se poderá ter em consideração é a integração de métodos de inteligência artificial no sistema como forma de prever o comportamento dos utilizadores.

Transversalmente, seria interessante modelar o problema como um problema de planeamento através do qual se procede ao dimensionamento dos equipamentos do parque, nomeadamente a potência do transformador (ou potência contratada), o dimensionamento dos circuitos elétricas e das respetivas proteções e por fim a potência das estações de carregamento.

Ao nível financeiro, poderá ser importante executar um estudo económico sobre a conjugação entre o número de CSs, potências máximas de carregamento das mesmas e o número de veículos. Adicionalmente, poderá ser efetuado uma análise da tarifa associada à tecnologia *vehicle-to-grid*, ou seja, o preço que o utilizador irá vender a energia à rede, tendo em consideração o preço da eletricidade e a degradação que poderá causar na bateria do veículo.

Outro aspeto que poderá ser relevante é associar a potência do parque a uma curva dependente do tempo, isto é, a maioria dos parques de estacionamento estão associados a outras infraestruturas como centros comerciais, escritórios de empresa ou prédios de habitação, razão pela qual seria interessante conjugar o carregamento dos veículos elétricos com o consumo dos outros aparelhos ligados à mesma infraestrutura.

Tendo em vista a sustentabilidade de todo o sistema energético, considera-se um desafio interessante de ser avaliado a possibilidade da utilização de fontes renováveis para o fornecimento de energia ao parque de estacionamento e o seu armazenamento em baterias.

## 7.Referências

- [1] “International Energy Agency”, Accessed: Oct. 02, 2021. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020/final-consumption>
- [2] T. Haasz *et al.*, “Perspectives on decarbonizing the transport sector in the EU-28,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 20, pp. 124–132, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.12.007>.
- [3] A. Mačiulis, A. V. Vasiliauskas, and G. Jakubauskas, “The impact of transport on the competitiveness of national economy,” *Transport*, vol. 24, no. 2, pp. 93–99, 2009, doi: [10.3846/1648-4142.2009.24.93-99](https://doi.org/10.3846/1648-4142.2009.24.93-99).
- [4] A. Ghosh, “Possibilities and Challenges for the Inclusion of the Electric Vehicle (EV) to Reduce the Carbon Footprint in the Transport Sector: A Review,” *Energies*, vol. 13, no. 10, 2020, doi: [10.3390/en13102602](https://doi.org/10.3390/en13102602).
- [5] A. Poullikkas, “Sustainable options for electric vehicle technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 1277–1287, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.016>.
- [6] “International Energy Agency.” <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electricity-demand-from-the-electric-vehicle-fleet-by-mode-2019-and-2030> (accessed Oct. 03, 2021).
- [7] J. Tomić and W. Kempton, “Using fleets of electric-drive vehicles for grid support,” *Journal of Power Sources*, vol. 168, no. 2, pp. 459–468, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.03.010>.
- [8] “‘Mais de 75% dos carregamentos de carros elétricos são feitos em casa’, refere Duarte Ferreira,” *Expresso*, Accessed: Oct. 29, 2021. [Online]. Available: <https://expresso.pt/iniciativaseprodutos/projetos-expresso/2021-10-28-Mais-de-75-dos-carregamentos-de-carros-eletricos-sao-feitos-em-casa-refere-Duarte-Ferreira-b65805d0>
- [9] “Removing Barriers to Electric Vehicle Adoption by Increasing Access to Charging Infrastructure,” 2014.
- [10] J. Babic, A. Carvalho, W. Ketter, and V. Podobnik, “Evaluating Policies for Parking Lots Handling Electric Vehicles,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 944–961, 2018, doi: [10.1109/ACCESS.2017.2777098](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2777098).
- [11] S. Pless *et al.*, “Integrating Electric Vehicle Charging Infrastructure into Commercial Buildings and Mixed-Use Communities: Design, Modeling, and Control Optimization Opportunities: Preprint,” 2020. [Online]. Available: [www.nrel.gov/publications](http://www.nrel.gov/publications).
- [12] J. Y. Yong, V. K. Ramachandaramurthy, K. M. Tan, and N. Mithulananthan, “A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects,” *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, vol. 49. Elsevier Ltd, pp. 365–385, May 16, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2015.04.130.
- [13] N. Daina and J. W. Polak, “Hazard based modelling of electric vehicles charging patterns,” in *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2016, pp. 479–484. doi: 10.1109/ITEC-AP.2016.7513002.
- [14] F. Orecchini, A. Santiangeli, and A. Dell’Era, “10 - EVs and HEVs Using Lithium-Ion Batteries,” in *Lithium-Ion Batteries*, G. Pistoia, Ed. Amsterdam: Elsevier, 2014, pp. 205–248. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59513-3.00010-8>.
- [15] T. Yoshida and K. Kojima, “Toyota MIRAI Fuel Cell Vehicle and Progress Toward a Future Hydrogen Society.” [Online]. Available: [www.electrochem.org](http://www.electrochem.org)
- [16] O. H. Hannisdahl, H. V. Malvik, and G. B. Wensaas, “The future is electric! The EV revolution in Norway — Explanations and lessons learned,” in *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, 2013, pp. 1–13. doi: 10.1109/EVS.2013.6914921.
- [17] D. Hall, S. Wapperhorst, P. Mock, and N. Lutsey, *European Electric Vehicle FactoBook 2019/2020*.
- [18] M. K. Loganathan, B. Mishra, C. M. Tan, T. Kongsvik, and R. N. Rai, “Multi-criteria decision making (MCDM) for the selection of Li-ion batteries used in electric vehicles (EVs),” *Materials Today: Proceedings*, vol. 41, pp. 1073–1077, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.179>.
- [19] C. Iclodean, B. Varga, N. Burnete, D. Cimerdean, and B. Jurchiș, “Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Oct. 2017, vol. 252, no. 1. doi: 10.1088/1757-899X/252/1/012058.
- [20] T. Sasaki, Y. Ukyo, and P. Novák, “Memory effect in a lithium-ion battery,” *Nature Materials*, vol. 12, no. 6, pp. 569–575, 2013, doi: 10.1038/nmat3623.
- [21] A. J. Hawkins, “A swiss startup company ‘Innolith’ try to developed a battery having high specific energy. URL <https://www.theverge.com/2019/4/4/18293989/innolith-ev-batterybreakthrough-lithium-ion>”.
- [22] “IEA, Evolution of Li-ion battery price, 1995-2019, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/evolution-of-li-ion-battery-price-1995-2019>”.
- [23] Volkswagen Group Fleet International, “Electric charging for fleets,” Dec. 2018.
- [24] P. Blockx, P. van den Bossche, N. Omar, J. van Mierlo, B. Rotthier, and J. Cappelle, “Beyond the plug and socket: Towards safe standardized charging infrastructures,” in *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, 2013, pp. 1–10. doi: 10.1109/EVS.2013.6914708.



- [25] "[https://www.tesla.com/pt\\_PT/supercharger](https://www.tesla.com/pt_PT/supercharger)", Accessed: Jun. 04, 2021. [Online]. Available: [https://www.tesla.com/pt\\_PT/supercharger](https://www.tesla.com/pt_PT/supercharger)
- [26] Cao Y., Ahmad N., Kaiwartya O., Puturs G., Khalid M. (2018) *Intelligent Transportation Systems Enabled ICT Framework for Electric Vehicle Charging in Smart City*. In: Maheswaran M., Badidi E. (eds) *Handbook of Smart Cities*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-97271-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97271-8_12).
- [27] IST - Instituto Superior Técnico - Departamento de Engenharia Cívil, "Estacionamento Mestrado Integrado em Engenharia Civil 3º Ano-2º Semestre," 2008.
- [28] J. Hill, G. Rhodes, S. Vollar, and C. Whapples, (2005). *Car park designers' handbook*. London: Thomas Telford.
- [29] D. Z. Morris, "Today's Cars Are Parked 95% of the Time," *Fortune*, 2016, Accessed: Jul. 08, 2021. [Online]. Available: <https://fortune.com/2016/03/13/cars-parked-95-percent-of-time/>
- [30] E. Alcover, B. Mas, V. Martínez-Moll, J. L. Rosselló, M. Roca, and V. Canals, "Energetic and economic analysis of the electric vehicles charge impacts on public parking lots," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 18, pp. 741–746, Jun. 2020, doi: 10.24084/repqj18.485.
- [31] Y. Chen, A. Oudalov, and J. S. Wang, "Integration of electric vehicle charging system into distribution network," *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, pp. 593–598, 2011.
- [32] M. D. Galus, M. Zima, and G. Andersson, "On integration of plug-in hybrid electric vehicles into existing power system structures," *Energy Policy*, vol. 38, no. 11, pp. 6736–6745, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.043>.
- [33] J. D. Broesch, "Chapter 7 - Applications of DSP," in *Digital Signal Processing*, J. D. Broesch, Ed. Burlington: Newnes, 2009, pp. 125–134. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8976-2.00007-9>.
- [34] S. Hussain, M. A. Ahmed, and Y.-C. Kim, "Efficient Power Management Algorithm Based on Fuzzy Logic Inference for Electric Vehicles Parking Lot," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 65467–65485, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2917297.
- [35] Z. Yi *et al.*, "A highly efficient control framework for centralized residential charging coordination of large electric vehicle populations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 117, p. 105661, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105661>.
- [36] J. Hu, H. Morais, T. Sousa, and M. Lind, "Electric vehicle fleet management in smart grids: A review of services, optimization and control aspects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56. Elsevier Ltd, pp. 1207–1226, Apr. 01, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.014.

- [37] E. Xydas, C. Marmaras, and L. M. Cipcigan, "A multi-agent based scheduling algorithm for adaptive electric vehicles charging," *Applied Energy*, vol. 177, pp. 354–365, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.034>.
- [38] M. S. Kuran, A. Carneiro Viana, L. Iannone, D. Kofman, G. Mermoud, and J. P. Vasseur, "A smart parking lot management system for scheduling the recharging of electric vehicles," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 6, pp. 2942–2953, Nov. 2015, doi: 10.1109/TSG.2015.2403287.
- [39] L. Yao, Z. Damiran, and W. H. Lim, "Optimal Charging and Discharging Scheduling for Electric Vehicles in a Parking Station with Photovoltaic System and Energy Storage System," *Energies*, vol. 10, no. 4, 2017, doi: 10.3390/en10040550.
- [40] Z. Liu, Q. Wu, S. Huang, L. Wang, M. Shahidehpour, and Y. Xue, "Optimal Day-Ahead Charging Scheduling of Electric Vehicles Through an Aggregative Game Model," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 5173–5184, 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2682340.
- [41] "Associação Portuguesa de Energias Renováveis." <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao> (accessed Oct. 01, 2021).
- [42] S. Pless *et al.*, "Integrating Electric Vehicle Charging Infrastructure into Commercial Buildings and Mixed-Use Communities: Design, Modeling, and Control Optimization Opportunities: Preprint," 2020. [Online]. Available: [www.nrel.gov/publications](http://www.nrel.gov/publications).
- [43] R. Figueiredo, P. Nunes, and M. C. Brito, "The feasibility of solar parking lots for electric vehicles," *Energy*, vol. 140, pp. 1182–1197, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.09.024.
- [44] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of benefits and challenges of vehicle-to-grid technology," in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 3082–3089. doi: 10.1109/ECCE.2012.6342356.
- [45] J. Fluhr, K.-H. Ahlert, and C. Weinhardt, "A Stochastic Model for Simulating the Availability of Electric Vehicles for Services to the Power Grid," in *2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2010, pp. 1–10. doi: 10.1109/HICSS.2010.33.
- [46] D. Wang, J. Coignard, T. Zeng, C. Zhang, and S. Saxena, "Quantifying electric vehicle battery degradation from driving vs. vehicle-to-grid services," *Journal of Power Sources*, vol. 332, pp. 193–203, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.09.116>.
- [47] EVSpecifications, "2019 Nissan Leaf." <https://www.evspecifications.com/en/model/78f99b> (accessed May 01, 2021).
- [48] "2021 Electrogenic Ltd." <https://www.electrogenic.co.uk/under-the-bonnet/technology/charging-times> (accessed Oct. 12, 2021).
- [49] G. Pasaoglu *et al.*, *Projections for electric vehicle load profiles in Europe based on travel survey data*. Publications Office, 2013.

- [50] Berlin, "Dominika Kalinowska Hartmut Kuhfeld Motor Vehicle Use and Travel Behaviour in Germany-Determinants of Car Mileage Discussion Papers," 2006. [Online]. Available: <http://www.diw.de>
- [51] Associação de utilizadores de veículos eletricos, "<https://www.uve.pt/page/vendas-ve-2019/>." <https://www.uve.pt/page/vendas-ve-2019/> (accessed Mar. 15, 2021).
- [52] EuroCabos, "TABELAS TÉCNICAS CONDUTORES ELÉCTRICOS ÍNDICE," 2021.