

**Gestão de Sistemas de Carregamento de Veículos
Elétricos num Parque de Estacionamento**

Pedro António Palhavã Marques da Silva

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientadores:

Prof. Hugo Gabriel Valente Morais

Prof. Rui Manuel Gameiro de Castro

Júri

Presidente: Célia Maria Santos Cardoso de Jesus

Orientador: Prof. Hugo Gabriel Valente Morais

Vogais: Dr. Tiago André Bastos de Sousa

Janeiro 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

Este trabalho é o culminar de cinco anos de estudo e trabalho intenso pelo que gostaria de deixar um agradecimento a todos aqueles que contribuíram de algum modo para esta fase.

Começo por agradecer à minha família pelo apoio e oportunidades que me deram ao longo de todo o meu percurso académico e me irão dar ao longo dos restantes desafios que aparecerem.

Esta tese de Mestrado foi supervisionada pelos Professores Rui Castro e Hugo Morais, aos quais agradeço a orientação ao longo do desenvolvimento desta dissertação. Um agradecimento especial ao Professor Hugo Morais pelo acompanhamento mais próximo, disponibilidade e ajuda que permitiram a concretização deste trabalho.

Resumo

A crescente penetração de veículos elétricos no mercado dos automóveis, desencadeada por preocupações ambientais, tem impulsionado a integração de carregadores no sistema elétrico de energia. Adicionalmente, os veículos elétricos, tal como os restantes automóveis, passam 90% do seu tempo estacionado. Assim, locais como os parques de estacionamento são ideais para a instalação de vários carregadores. Esta instalação implica o desenvolvimento de sistemas de gestão energética dedicados para a gestão de parques de estacionamento com múltiplos carregadores. Esta tese propõe uma metodologia determinística para a gestão e controlo do sistema de carregamento de veículos elétricos em parques de estacionamento. O modelo proposto tem em consideração vários aspetos relacionados com a operação dos carregadores e o dimensionamento do parque. A metodologia proposta é testada e validada em três casos de estudo. O primeiro caso compara o desempenho do modelo na gestão de carregadores individuais e carregadores mais centralizados. O segundo caso de estudo avalia a opção de utilizadores *premium*. O terceiro caso de estudo parte das conclusões tiradas nos primeiros casos de estudo através da simulação de possíveis arquiteturas de carregamento para a adoção em larga escala de veículos elétricos. Os resultados mostram que o método proposto considera adequadamente todos os critérios económicos, técnicos e funcionais associados aos parques de estacionamento e garantindo um carregamento adequado dos veículos elétricos.

Keywords— Veículos Elétricos, Parques de Estacionamento, Gestão de Carregamento, Problema de Otimização

Abstract

The growing penetration of EVs (electric vehicles) in the automotive market, triggered by environmental concerns, has boosted the integration of chargers in the electric power system. Also, electric vehicles, like any other car, spends 90% of their time parked. Thus, parking lots are ideal places for installing multiple chargers. This installation will require complex energy management of the systems to be installed in the parking lot. This thesis proposes a deterministic methodology for the management and control of the charge stations for electric vehicles in parking lots. The proposed model takes into account several aspects related to the chargers' operation and the design of the parking lot. The proposed methodology is tested and validated in three case studies. The first case compares the performance of the model in the management of individual chargers versus central chargers while the second case evaluates the option of premium users. The third case study puts into practice the conclusions drawn in the previous case studies through the simulation of possible charging architectures for the wide adoption of electric vehicles. The results show that the proposed method overcomes the economic and technical barriers associated with parking lots and guarantees a good EV charging.

Keywords— Electric Vehicles, Parking Lots, Charging Management, Optimization Problem

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract	v
Índice	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	viii
Siglas	ix
Nomenclatura	x
1 Introdução	3
1.1 Problema	4
1.2 Estrutura da Dissertação	5
2 Estado da Arte	7
2.1 Veículos Elétricos	7
2.2 Sistema de Carregamento	9
2.3 Parques de Estacionamento	10
2.4 Programação Inteira Mista	11
3 Metodologia	13
3.1 Software de Simulação	13
3.2 Função Objetivo	13
3.3 Regras do Parque	14
4 Casos de Estudo	17
4.1 Descrição dos Cenários	17
4.2 Caso de Estudo 1	18
4.2.1 Análise Estatística - CE1	18
4.2.2 Conclusões - CE1	34
4.3 Caso de Estudo 2	37
4.3.1 Análise Estatística - CE2	37
4.3.2 Conclusões - CE2	43
4.4 Caso de Estudo 3	46
4.4.1 Análise Estatística - CE3	46
4.4.2 Conclusões - CE3	65
5 Conclusões e Trabalho Futuro	68
5.1 Trabalho Futuro	69
Referências	70

Lista de Figuras

1	Consumo Global de Energia Primária [1]	3
2	Consumo Final de Energia por Setor [2]	3
3	Consumo de Energia no setor dos Transportes [3]	3
4	Diagrama de Carga para diferentes percentagens de adoção de Veículos Elétricos	5
5	Vendas Anuais de veículos elétricos ligeiros nas principais regiões	8
6	Diferentes tipos de fichas: a) connector, b) inlet	10
7	Ilustração do Carregamento sem fios de um EV	10
8	Gráficos da Hipótese 1 - 5 Lugares	19
9	Gráficos da Hipótese 2 - 5 Lugares	20
10	Gráficos da Hipótese 3 - 5 Lugares	21
11	Gráficos da Hipótese 4 - 5 Lugares	22
12	Progressão da Função Objetivo - 5 Lugares	23
13	Valores da variável minSOC por Período - 5 Lugares	24
14	Gráficos da Hipótese 1 - 6 Lugares e 24 Períodos	25
15	Gráficos da Hipótese 2 - 6 Lugares e 24 Períodos	26
16	Gráficos da Hipótese 3 - 6 Lugares e 24 Períodos	27
17	Gráficos da Hipótese 4 - 6 Lugares e 24 Períodos	27
18	Progressão da Função Objetivo - 6 EVs - 24 Períodos	28
19	Valores da variável minSOC por Período - 6 EVs - 24 Períodos	29
20	Gráficos da Hipótese 1 - 6 Lugares e 48 Períodos	30
21	Gráficos da Hipótese 2 - 6 Lugares e 48 Períodos	30
22	Gráficos da Hipótese 3 - 6 Lugares e 48 Períodos	31
23	Gráficos da Hipótese 4 - 6 Lugares e 48 Períodos	32
24	Progressão da Função Objetivo - 6 EVs - 48 Períodos	33
25	Valores da variável minSOC por Período - 6 EVs - 48 Períodos	34
26	Evolução Temporal do Estado das Baterias da Hipótese 1 - 10 Lugares	38
27	Distribuição Temporal da Potência de Carregamento da Hipótese 1 - 10 Lugares	38
28	Evolução Temporal do Estado das Baterias da Hipótese 2 - 10 Lugares	39
29	Distribuição Temporal da Potência de Carregamento da Hipótese 2 - 10 Lugares	39
30	Evolução Temporal do Estado das Baterias da Hipótese 3 - 10 Lugares	40
31	Distribuição Temporal da Potência de Carregamento da Hipótese 3 - 10 Lugares	41
32	Evolução Temporal do Estado das Baterias da Hipótese 4 - 10 Lugares	42
33	Distribuição Temporal da Potência de Carregamento da Hipótese 4 - 10 Lugares	42
34	Progressão da Função Objetivo - 10 EVs - 24 Períodos	43
35	Valores da variável MinSOC por Período - 10 EVs - 24 Períodos	43
36	Energia Distribuída pelo Parque de Estacionamento durante a Simulação - 100 EVs - 576 Períodos	49
37	Progressão Temporal da Função Objetivo no estudo dos limites - 100 EVs - 576 Períodos	49
38	Progressão Temporal da Função Objetivo no estudo das penalizações - 100 EVs - 576 Períodos	52
39	Diagrama de Carga - 10CS-10kW	58
40	Diagrama de Carga - 10CS-11kW	58
41	Diagrama de Carga - 20CS-10kW	58
42	Diagrama de Carga - 20CS-11kW	58
43	Diagrama de Carga - 10CS-22kW	58
44	Diagrama de Carga - 12CS-22kW	58
45	Diagrama de Carga - 6CS-50kW	59
46	Diagrama de Carga - 15CS-22kW	59
47	Diagrama de Carga - 1CS-350kW	60
48	Diagrama de Carga - 7CS-50kW	60
49	Diagrama de Carga - 33CS-11kW	60
50	Diagrama de Carga - 100CS-3,7kW	60
51	Diagrama de Carga - 17CS-22kW	60
52	Diagrama de Carga - 30CS-22kW	61
53	Diagrama de Carga - 14CS-50kW	61
54	Diagrama de Carga - 100CS-7,2kW	61
55	Diagrama de Carga - 33CS-22kW	61
56	Progressão da Função Objetivo - 100 Lugares e 576 Períodos	61
57	Progressão da Função objetivo - 10CS-10kW e 10CS-11kW	62
58	Progressão da Função objetivo - 20CS-10kW, 20CS-11kW, 10CS-22kW e 12CS-22kW	62
59	Progressão da Função objetivo - 6CS-50kW, 15CS-22kW, 1CS-350kW, 7CS-50kW, 33CS-11kW, 100CS-3,7kW e 12CS-22kW	63
60	Progressão da Função objetivo - 30CS-22kW, 14CS-50kW, 100CS-7,2kW e 33CS-22kW	64

Lista de Tabelas

1	Custos associados à instalação de Estações de Carregamento segundo a Volkswagen	11
2	Caracterização dos Casos de Estudo	17
3	Caracterização dos EVs para um Parque de Estacionamento de 5 Lugares	19
4	Estado de Bateria Final - Hip. 1 - 5 Lugares	20
5	Estado de Bateria Final - Hip. 2 - 5 Lugares	21
6	Estado de Bateria Final - Hip. 3 - 5 Lugares	22
7	Estado de Bateria Final - Hip. 4 - 5 Lugares	23
8	Caracterização dos EVs para um Parque de Estacionamento de 6 Lugares - 24 Períodos	24
9	Estado de Bateria Final - Hip.1 - 6 Lugares e 24 Períodos	25
10	Estado de Bateria Final - Hip.2 - 6 Lugares e 24 Períodos	26
11	Estado de Bateria Final - Hip.3 - 6 Lugares e 24 Períodos	27
12	Estado de Bateria Final - Hip.4 - 6 Lugares e 24 Períodos	28
13	Caracterização dos EVs para um Parque de Estacionamento de 6 Lugares - 48 Períodos	29
14	Estado de Bateria Final - Hip.1 - 6 Lugares e 48 Períodos	30
15	Estado de Bateria Final - Hip.2 - 6 Lugares e 48 Períodos	31
16	Estado de Bateria Final - Hip.3 - 6 Lugares e 48 Períodos	32
17	Estado de Bateria Final - Hip.4 - 6 Lugares e 48 Períodos	33
18	Valores Finais de Bateria de cada EV em percentagem - 5 Lugares	34
19	Valores Finais de Bateria de cada EV em percentagem - 6 Lugares - 24 Períodos	35
20	Valores Finais de Bateria de cada EV em percentagem - 6 Lugares - 48 Períodos	36
21	Caracterização dos EVs para um Parque de Estacionamento de 10 Lugares	37
22	Estado de Bateria Final - Hip.1 - 10 Lugares	39
23	Estado de Bateria Final - Hip.2 - 10 Lugares	40
24	Estado de Bateria Final - Hip.3 - 10 Lugares	41
25	Estado de Bateria Final - Hip.4 - 10 Lugares	42
26	Valores Finais de Bateria de cada EV em Percentagem - 10 Lugares	44
27	Caracterização dos EVs para um Parque de Estacionamento de 100 Lugares	46
28	Caracterização do Estudo dos Limites	47
29	Valores Médios Finais dos Grupos e Perfis de EVs em Percentagem - Limites	47
30	Energia Média entregue aos Grupos e Perfis em kWh - Limites	48
31	Caracterização do Estudo das Penalizações	50
32	Valores Médios Finais dos Grupos e Perfis de EVs em Percentagem - Penalização	50
33	Potência Média entregue aos Grupos e Perfis em kWh - Penalização	51
34	Custos associados a Carregadores Individuais	52
35	Descrição das Hipóteses Estudadas - 100 Lugares e 576 Períodos	53
36	Investimento Necessário para o desenvolvimento de cada Arquitetura	54
37	Valores Médios Finais da Bateria para cada Grupo e Perfil - 100 Lugares e 576 Períodos	55
38	Distribuição da Energia Média para cada Grupo e Perfil - 100 Lugares e 576 Períodos	57
39	Valores Médios Finais da Bateria para cada Grupo e Perfil - 100 Lugares, 576 Períodos e VIPs - 15CS-22kW	64
40	Valores Médios Finais da Bateria para cada Grupo e Perfil - 100 Lugares, 576 Períodos e VIPs - 17CS-22kW	65

Siglas

AC Corrente Alternada.

BEV Veículo Elétrico a Bateria.

CO₂ Dióxido de Carbono.

CS Estação de Carregamento.

DC Corrente Contínua.

EEA Agência Europeia do Ambiente.

EV Veículo Elétrico.

EXCEL Microsoft Excel.

G2V Grid-to-Vehicle.

GAMS General Algebraic Modeling System.

GtCO₂ Giga tonelada de Dióxido de Carbono.

IEC Comissão Electromecânica.

MATLAB Matrix Laboratory.

MIP Programação Inteira Mista.

PHEV Veículo Elétrico Híbrido Plug-in.

RNC2050 Roadmap for Carbon Neutrality 2050.

V2G Vehicle-to-Grid.

Nomenclatura

$\Delta P_{ch(EV,t)}$	Varição de potência de carregamento para o veículo EV no período t
η_{CS}	Eficiência do carregamento de cada carregador
$E_f(EV,t)$	Energia do veículo EV no final do período t
$E_i(EV,t)$	Energia do veículo EV no início do período t
$E_{maxEV(EV,t)}$	Capacidade máxima do veículo EV
F_{obj}	Função Objetivo
$\min SOC(t)$	Valor da bateria do veículo com menos bateria no período t
N_{CS}	Número de Estações de Carregamento
N_{EV}	Número de Veículos Elétricos
$P_{ch(EV,t)}$	Potência carregada no veículo EV no período t
$P_{CS(CS)}$	Potência no Carregador CS
$P_{maxCh(EV,t)}$	Potência de carregamento máxima para o veículo EV no período t
$P_{maxCS(CS)}$	Potência máxima num carregador CS
$P_{maxCSt(CS,t)}$	Potência máxima do carregador CS no período t
$P_{maxPark(t)}$	Potência máxima no parque de estacionamento no período t
$P_{minCh(EV,t)}$	Potência de carregamento mínima para o veículo EV no período t
$P_{minMCP(EV,t)}$	Potência mínima de carregamento do veículo EV no período t
$P_{SocL1(EV,t)}, P_{SocL2(EV,t)}, P_{SocL3(EV,t)}$	Potência necessária para o carregamento do veículo EV no período t para cada nível
$PF_{MCP(EV,t)}$	Fator de penalização do carregamento da potência mínimo
$PF_{\min SOC(t)}$	Fator de penalização para o veículo com menor valor de bateria
$PF_{SocL1(EV,t)}, PF_{SocL2(EV,t)}, PF_{SocL3(EV,t)}$	Fator de penalização para cada nível de bateria consoante o veículo EV no período t
$PF_{VarP(EV,t)}$	Fator de penalização para a variação da potência de carregamento
$SOC(EV,t)$	Bateria do veículo EV no período t
t	Período
$X_{Place(EV,CS,t)}$	Lugar e carregador CS correspondente ao veículo EV no período t

1 Introdução

O acesso à Energia é um dos mais importantes pilares para o bem-estar e desenvolvimento económico. Historicamente, a energia produzida por combustão directa de matérias naturais (madeira, carvão, etc.) era a opção predominante. No entanto, o início da revolução industrial fez-se acompanhar de um investimento em combustíveis fósseis como impulsionador da industrialização e crescimento económico. Como apresentado por Hannah Richie no site de *Our World in Data*, o uso de energia de origem fóssil passou de desprezável a ser a fonte predominante como podemos observar na Figura 1 [1].

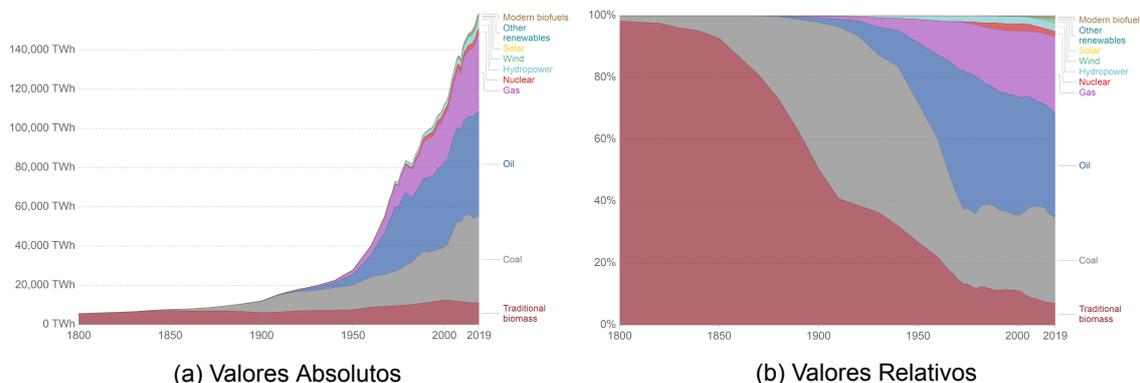


Figura 1: Consumo Global de Energia Primária [1]

O contínuo crescimento da exigência energética levou a uma forte dependência de todos os setores em relação aos combustíveis fósseis. Estes setores dividem-se por: residencial, comercial, industrial e, por fim, transportes. De acordo com a Agência Europeia do Ambiente (EEA), este último setor representa continuamente cerca de 30% do consumo final [2]. Adicionalmente, a AEA avança que todo o setor dos transportes se abastece quase unicamente a partir de combustíveis de origem fóssil [3]. Estes dados podem ser vistos nas Figuras 2 e 3.

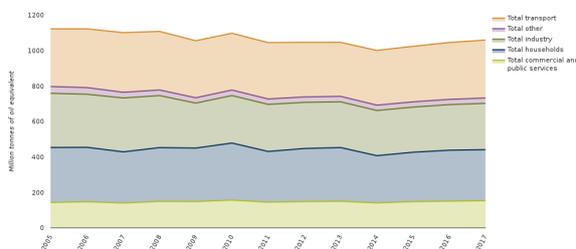


Figura 2: Consumo Final de Energia por Setor [2]

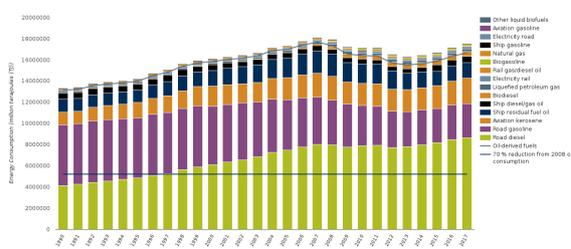


Figura 3: Consumo de Energia no setor dos Transportes [3]

O uso ininterrupto de combustíveis fósseis no sector dos transportes está directamente associado ao aumento da concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera. Hoje em dia, é reconhecido pela comunidade científica que as emissões de CO_2 são responsáveis pelas consequências do aquecimento global: aumento da temperatura global do planeta e alterações do sistema climático. Em 2016, as emissões europeias de CO_2 chegaram aos 4.8 Gt CO_2 sendo a produção de energia a maior fração de emissões destes gases prejudiciais da atmosfera enquanto que o setor dos transportes responsabiliza-se por 20% deste valor [4]. Adicionalmente, em 2017, o transporte rodoviário representava 72% de todas as emissões CO_2 relacionadas com o setor dos transportes. Destas emissões, 44% são provenientes de veículos de passageiros, 9% de veículos comerciais ligeiros e 19% vieram de veículos pesados [5]. Devido à densidade populacional das cidades, existe uma elevada concentração destes gases poluentes nas mesmas.

As consequências negativas da poluição tem vindo a incentivar os governos para a adoção de políticas capazes de reduzir as emissões de CO_2 e atingir os objetivos estabelecidos no Protocolo de Quioto e no Acordo de Paris. No primeiro, ficou estabelecido uma limitação e redução das emissões de gases estufa enquanto, no segundo, os

países devem adoptar novas estruturas capazes de atingir e limitar o aumento da temperatura global do planeta em 1.5°C. De acordo com Roadmap for Carbon Neutrality 2050 (RNC2050) elaborado pelo governo português [6], em particular no setor dos transportes, as seguintes linhas de ação são recomendadas:

- Maior eficiência e reforço dos sistemas de transporte público através da renovação das frotas e expansão das redes de metro e comboio;
- Adoção em larga escala de veículos elétricos. Já foram estabelecidos incentivos à compra de veículos 100% elétricos através de financiamentos. O Estado Português estabeleceu que, a partir de 1 de Janeiro de 2020, na compra de um automóvel 100% elétrico, o comprador pode-se candidatar a um incentivo no valor de 3000€. Esta oferta é exclusiva às primeiras 700 candidaturas para veículos ligeiros de uso particular [7].
- Descarbonização do transporte de mercadoria de curta e longa distância, promovendo uma cadeia logística com uma repartição modal que minimize a intensidade carbónica e energética do sistema de transporte;

À medida que cresce a exigência de diminuir as emissões de gases por parte do setor dos transportes, também aumenta a popularidade dos veículos elétricos como alternativa ao automóveis com motores de combustão interna, aumentando a sua penetração no mercado. Este cenário levou a que os grandes fabricantes de veículos tenham feito investimentos elevados no desenvolvimento de veículos com motor elétrico de modo a diversificar a sua oferta [8].

1.1 Problema

Dois dos grandes desafios para o desenvolvimento dos veículos elétricos são a autonomia das baterias, em comparação com os veículos com motores de combustão interna, e o carregamento das baterias. No primeiro caso, embora as baterias apresentem atualmente valores de densidade de energia bastante superiores [9] e, consequentemente, a autonomia das baterias tenha-se aproximado dos valores dos motores de combustão interna, ainda não igualou esses valores o que é uma desvantagem em relação à opção dominante. Relativamente ao carregamento dos veículos elétricos existem vários aspetos que complicam o seu sucesso comercial:

1. O tempo de carregamento pode variar e a localização dos carregadores também. A velocidade do carregamento é dependente da potência de cada carregador e capacidade da bateria do veículo elétrico. Pode variar entre 20-30 min para um carregador rápido e entre 6-8h para um carregador lento.
2. A necessidade de criar e instalar uma rede de carregadores pública e acessível.
3. A potência associada a cada carregador pode levar à sobrecarga da rede elétrica que já se encontra dimensionada, ou seja, já se encontra dimensionada para um consumo tradicional.

Tendo em conta estes pontos, os governos Europeus não só têm criado incentivos à compra de veículos elétricos como também têm sido os principais impulsionadores na instalação das infraestruturas necessárias para o carregamento, tanto lento como rápido [10]. Adicionalmente, a *Clean Fuel Directive* pretende uniformizar os tipos de ligações para cada nível de carregador com o intuito de acelerar o desenvolvimento destas tecnologias. Outro factor de incompatibilidade são os diferentes sistemas comerciais usados pelos carregadores para fazer o pagamento, a identificação e comunicação do carregamento [8].

Do ponto de vista de gestão da rede elétrica, a instalação de um carregador cria uma série de desafios e oportunidades. Uma adoção em larga escala dos veículos elétricos deverá ser acompanhada pela instalação de carregadores. O consequente uso implicará um aumento significativo da carga na rede de distribuição podendo ocorrer situações com elevadas concentrações de veículos elétricos a carregar durante períodos de ponta podendo levar à sobrecarga dos elementos da rede [11]. Vários estudos [12, 13, 14] indicam que a integração dos veículos elétricos na rede sem qualquer tipo de sistema de controlo podem levar ao aumento dos picos de ponta e também à criação de novos picos em períodos fora de ponta. Na figura 4, pode-se observar a influência de diferentes quantidades de veículos elétricos num diagrama de carga [15].

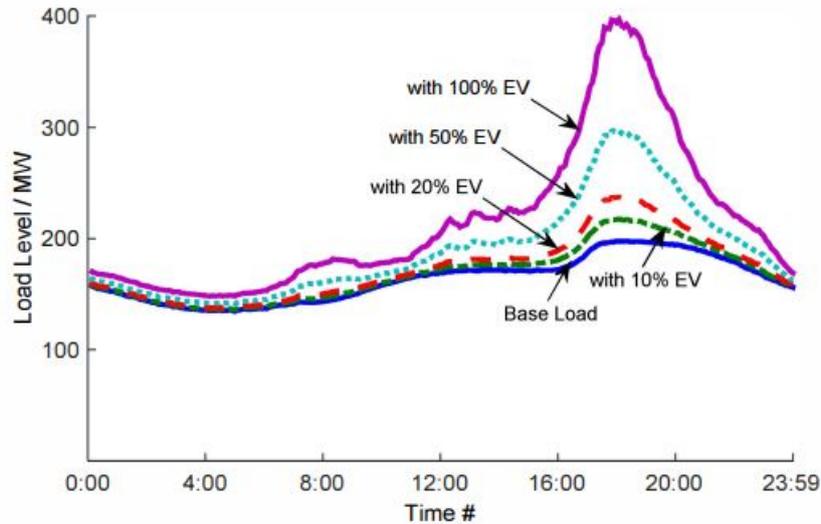


Figura 4: Diagrama de Carga para diferentes percentagens de adoção de Veículos Elétricos

Uma possibilidade para mitigar este problema é a adoção de tarifários com diferenças de preço ao longo do dia de forma a estimular os consumidores a efetuarem o carregamento dos veículos elétricos nos períodos em que a energia é mais barata (períodos de vazio). Neste caso, o controlo do carregamento é feito apenas por incentivos económicos sendo que não se gere a potência entregue ao veículo [16].

Partindo do mesmo conceito, surge outra hipótese que através do controlo do tempo e da potência entregue ao veículo permite deslocar a procura de potência de períodos de ponta para os períodos com menor procura enquanto o veículo está ligado à rede elétrica. Este tipo de gestão do carregamento dos veículos elétricos é conhecido por Grid-to-Vehicles (G2V). Ainda que seja um dos métodos mais simples de controlo, é possível reduzir os impactos negativos da integração de um elevado número de veículos elétricos na rede elétrica [17]. Este cenário de carregamento simultâneo de vários veículos poderá acontecer em locais como parques de estacionamento que tenham as infraestruturas necessárias exigindo uma gestão coordenada do carregamento para minimizar os custos enquanto se apresenta um bom desempenho do serviço [18].

Neste trabalho é proposto um modelo de otimização e controlo do sistema de carregamento de veículos elétricos num parque de estacionamento para vários cenários diferentes, a fim de se obter uma análise do desempenho do parque no carregamento dos veículos e minimizando o custo financeiro do investimento em equipamento técnico.

A otimização do modelo é um problema de programação inteira mista. A análise do desempenho considera a energia usada no carregamento e o estado de carregamento dos veículos elétricos. A análise financeira terá em conta tanto os gastos operacionais como os custos de aquisição e instalação dos carregadores.

Para tal, fez-se uma análise detalhada tanto das infraestruturas de estacionamento como de todos os elementos técnicos relacionados com o carregamento de veículos elétricos para identificar quais são os fatores que mais influenciam o desempenho do parque. Adicionalmente, estudou-se o mercado português de veículos elétricos para as simulações fazerem uma representação precisa da atualidade.

1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é composta por cinco capítulos organizados de seguinte modo:

1. Capítulo 1 - Introdução e apresentação dos objetivos e estrutura da dissertação;
2. Capítulo 2 - Apresentação do estado da arte dos Veículos Elétricos, Carregamento de Veículos Elétricos, Parques de Estacionamento e Técnica de Otimização;
3. Capítulo 3 - Descrição Geral do Modelo Proposto e das restrições;
4. Capítulo 4 - Apresentação dos Casos de Estudo e dos resultados das simulações em MATLAB;

5. Capítulo 5 - Conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 Estado da Arte

Nesta secção pretende-se apresentar o estado da arte dos veículos elétricos, das tecnologias usadas para o seu carregamento e a sua gestão em parques de estacionamento.

2.1 Veículos Elétricos

Os veículos elétricos surgiram após a invenção do motor elétrico no Séc. XIX e competiu com os veículos de combustão interna durante os primeiros anos da indústria automóvel. No início do século XX, os veículos elétricos perderam a popularidade no mercado quando os veículos com motores de combustão interna foram capazes de ultrapassar as suas barreiras tornando-se a tecnologia dominante até aos dias de hoje [19].

A popularidade dos veículos elétricos ressurgiu à medida em que aumentavam os alertas para as emissões de CO₂ e o preço dos combustíveis fósseis. Como resposta, vários fabricantes de automóveis viraram parte dos seus esforços para recuperar e melhorar esta tecnologia. Atualmente, os veículos elétricos podem ser divididos em três categorias consoante o tipo de fonte de energia: Veículo Elétrico a Bateria (BEV), Veículo Elétrico Híbrido Plug-in (PHEV) e Veículo a Célula de Combustível [19].

Um BEV caracteriza-se por usar um motor elétrico como única fonte de propulsão alimentado por baterias. Os BEVs têm sistemas de propulsão totalmente elétricos pelo que a autonomia do automóvel está directamente ligada à capacidade da bateria que pode ser carregada externamente com uma ligação à rede ou através da travagem regenerativa [20]. Atualmente, as baterias de Lítio têm a maior fração de mercado devido à sua elevada capacidade de energia [21]. Um exemplo deste tipo de veículos é o Nissan Leaf.

Um PHEV é um veículo com duas formas de propulsão, um motor de combustão interna e um motor elétrico alimentados por combustível e uma bateria, respetivamente. À semelhança dos restantes veículos híbridos, os PHEVs podem ter várias configurações de transmissão como série, paralelo e série-paralelo. A diferença em relação aos restantes veículos híbridos trata-se da sua capacidade de serem ligados à rede elétrica para carregar as baterias. Um exemplo deste tipo de veículos é o Hyundai Ioniq.

Um Veículo movido a célula de combustível usa, tipicamente, Hidrogénio como fonte de energia. Ao contrário dos veículos com motores de combustão interna, este tipo de veículo combina Hidrogénio e Oxigénio para produzir eletricidade sendo os únicos subprodutos desta reação: calor e água. No entanto, este tipo de veículos não são tão competitivos devido a questões económicas e de segurança [22]. Um exemplo deste tipo de veículo é Hyundai Tucson.

Daqui para a frente, o termo EV será usado para descrever todos os veículos pertencentes às categorias BEV e PHEV.

Hoje em dia, os EVs apresentam melhor eficiência energética do que os veículos de combustão interna. Ahman [23] mostrou que os vários veículos elétricos têm o dobro da eficiência energética do que os veículos com motor de combustão interna o que leva a uma redução das emissões de gases estufa. Para comparar o nível de emissões entre estes veículos, foi introduzido o parâmetro das emissões *wells-to-wheels* que tem em conta as emissões durante todo o ciclo de vida do veículo, incluindo a energia e matérias usadas para abastecer um veículo e as emissões diretas do tubo de escape. Estudos mostram que os EVs têm os menores níveis de emissões *wells-to-wheels* desde que a produção de energia seja efetuada através de fontes renováveis [24]. JongRoul Woo [24] avança que, na Rússia, os veículos elétricos apresentam os valores de emissões de CO₂ semelhantes aos veículos convencionais quando 66% da sua produção de energia está associada a combustíveis fósseis. Estas, são boas notícias para os EVs uma vez que se vê um desinvestimento na procura de combustível fóssil. Pela natureza dos seus sistemas, os EVs apresentam outras vantagens como não necessitarem de tão frequente manutenção e terem um modo de funcionamento bastante mais silencioso quando comparado com os veículos com motor de combustão interna.

Em especial, as baterias são um dos elementos centrais dos EVs responsáveis por armazenar a energia que alimenta os motores elétricos. Consistem em conjuntos de células electroquímicas que convertem a energia potencial química em energia elétrica e a transmitem através de ligações externas ao motor. As baterias dos EVs são bastante específicas uma vez que se exige potência e capacidade elétrica elevada para um bom desempenho, tamanho mínimo e preço acessível. De acordo com *Electric Vehicle Battery Technologies* por Kwo Young et al. [24],

para além do preço e de aspetos relativos à segurança de utilização, são tidos em conta os seguintes fatores:

- Energia Específica e a Densidade de Energia definem quanta energia pode ser armazenada na bateria por unidade de massa (Wh/kg) e volume (Wh/l), respetivamente. Estes parâmetros influenciam a autonomia do EV na medida em que quanto maior forem, mais leve e pequena será a bateria aumentando a sua capacidade para armazenar energia;
- Potência Específica representa a potência máxima por unidade de massa (W/kg) que descreve a capacidade de bateria de responder a uma exigência de potência de pico por parte do motor. Está directamente relacionada com a velocidade e com o tempo de carregamento do EV;
- Ciclo de vida é o número de ciclos de carregamento-descarregamento que a bateria pode suportar com uma profundidade de descarga específica (geralmente 80%) antes de falhar certos critérios de desempenho. A profundidade de descarga é a percentagem de bateria que foi descarregada. Este parâmetro afecta directamente a vida operacional real da bateria.

Devido à complexidade das baterias usadas pelos EVs, vários estudos e investimentos foram feitos tendo-se concluído que as baterias de Lítio e Níquel são, para já, as mais adequadas. Em particular, as baterias de Lítio são as baterias mais usadas nos EVs devido ao seu peso reduzido e elevados valores de energia específica, densidade de energia e potência específica. Segundo Iclodean et al. [21], os maiores inconvenientes das baterias de Lítio são o custo de produção e a elevada temperatura operacional.

O elevado preço da produção independente da composição química da bateria tem sido recorrentemente um principais desvantagens apontadas aos veículos elétricos do ponto de vista do consumidor. Consequentemente, o valor dos vários modelos de EVs são comparativamente mais caros em relação aos automóveis com motor de combustão interna. Juntamente com a questão da autonomia, têm vindo a desencorajar os consumidores a aceitarem e investirem neste tipo de veículos. Numa rápida análise da penetração dos veículos elétricos, observa-se que os países com os incentivos mais fortes apresentam também as maiores quotas de mercado de veículos elétricos. Estes países aplicam vários estímulos fiscais ao mercado dos EVs tornando-os uma escolha competitiva quando comparados os automóveis de combustão interna. Um destes países foi a Noruega que combinou penalizações aos veículos de combustão interna com incentivos aos veículos elétricos. Com este sistema, a Noruega alcançou o maior crescimento europeu na percentagem de inscrição de novos veículos elétricos entre 2010 e 2015 [25]. Um artigo apresentado pela Deloitte concluiu que, em 2019, os veículos elétricos representam cerca de 2,5% de todas as vendas mundiais de automóveis mantendo a tendência de crescimento global como se vê na Figura 5 [26].

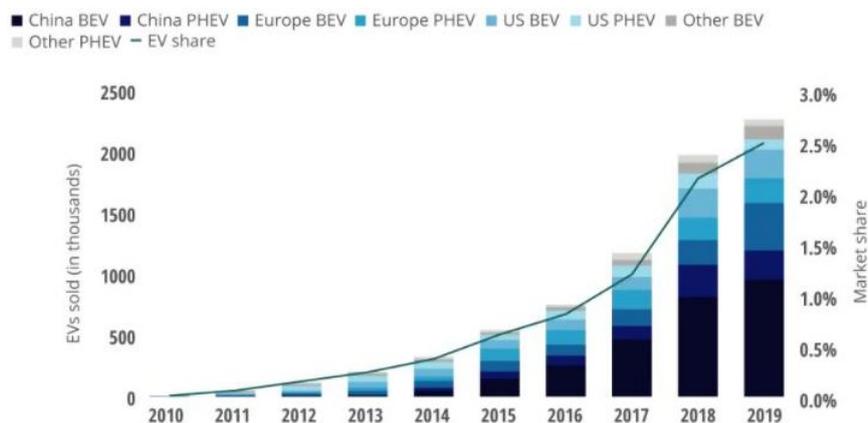


Figura 5: Vendas Anuais de veículos elétricos ligeiros nas principais regiões

Ainda que a maioria dos construtores de EVs estejam a investir no desenvolvimento desta tecnologia, os modelos disponíveis são reduzidos [27]. Relativamente ao mercado português, e de acordo com a Associação de Utilizadores de Veículos Elétricos [28], os veículos elétricos com maior percentagem de presença são:

1. 16% Nissan Leaf – 40kWh;
2. 13% Tesla Model 3 – 75kWh;

3. 10% BMW I3 – 42kWh;
4. 10% Renault Zoe – 41kWh;
5. 9% Jaguar I-Pace – 90kWh;
6. 8% Mercedes E300 – 13,5kWh;
7. 8% BMW 530e – 12kWh;
8. 7% Mini Countrymen – 7,6kWh;
9. 6% Hyundai Kauai – 39kWh;
10. 5% Mitsubishi Plug-in Hybrid Outlander – 12kWh;
11. 5% Smart Fortwo – 17,6kWh;
12. Os restantes 3% são partilhados por vários modelos de EVs.

2.2 Sistema de Carregamento

Como já foi referido, o sucesso comercial dos EVs está intimamente ligado ao desenvolvimento de uma rede de carregadores acessível. Por princípio, os EVs podem ser carregados tanto por uma corrente alternada (AC), monofásica ou trifásica, ou corrente contínua (DC). No primeiro caso, a corrente alternada proveniente da rede será convertida para corrente contínua através de um retificador instalado no carro enquanto, no segundo caso, a corrente contínua é transmitida para a bateria através de um cabo.

De acordo com a Comissão Internacional de Electromecânica (IEC), os sistemas de carregamento são padronizados pela IEC 61851 [29]:

- Modo 1 - carregamento lento AC a partir de uma tomada tradicional sem comunicação e correntes inferiores a 16 A. Existem uma série de preocupações em relação à operação segura devido à sua simplicidade e baixo custo de investimento. Apenas pode ser usado por pequenos veículos elétricos como bicicletas elétricas.
- Modo 2 - carregamento lento AC a partir de uma tomada tradicional com um dispositivo de proteção do cabo e corrente máxima de 32 A. O Modo 2 também permite o uso de uma tomada trifásica desde que seja incluída um caixa de controlo no cabo.
- Modo 3 - carregamento lento ou rápido AC que requer o uso de um equipamento de controlo e proteção e uma tomada específica para EVs. O controlador pode incluir a seleção da velocidade do carregamento. A energia só é transmitida quando o cabo está correctamente ligado nas duas extremidades e o circuito terra se encontra em funcionamento.
- Modo 4 - carregamento rápido DC com uso de um carregador externo. Um sistema de comunicação está incluído para permitir a gestão do carregamento.

O uso de condutores piloto de controlo leva à introdução de acessórios específicos para o carregamento. Do mesmo modo, através da padronização feita por IEC 62196 foram reconhecidas três fichas:

1. Type 1 - Ficha monofásica equipada dimensionada para 250V e 32A com dois contactos extras, proposto pela companhia japonesa Yazaki;
2. Type 2 - Ficha monofásica e trifásica dimensionada para correntes máximas iguais a 63A que permite carregamentos semi-rápidos. Conhecida por Mennekes;
3. Type 3 - Ficha trifásica conhecida como Scame. Desenho semelhante à ficha Mennekes excepto a presença de fechos de segurança.

Para o carregamento DC (Modo 4), apenas existe uma ficha em uso que se trata do padrão CHAdeMO que aparece como uma solução japonesa para carregamento rápido. As fichas Combo 1 e 2 foram criadas para permitir um aumento da flexibilidade no carregamento dos EVs uma vez que habilitam ao carregamento normal AC e o carregamento rápido DC na mesma ficha. Estas fichas permitem diferentes estratégias de carregamento na mesma estação com diferentes desempenhos. Na Figura 6 podemos observar todas as opções para os diferentes carregamentos.



Figura 6: Diferentes tipos de fichas: a) connector, b) inlet

Para além do carregamento por acoplamento condutivo, existe o carregamento por acoplamento indutivo. Este método, também conhecido por carregamento sem fios, carrega a bateria do EV sem pontos de contacto, o carregamento é feito através de indução electromagnética como se pode ver na Figura 7 [30]. Outro método de carregamento baseia-se na troca da bateria vazia por uma bateria carregada. Este é um conceito que embora resolva os problemas do carregamento rápido, não é uma solução muito adotada uma vez que exige modelo de bateria padrão no veículos elétricos.

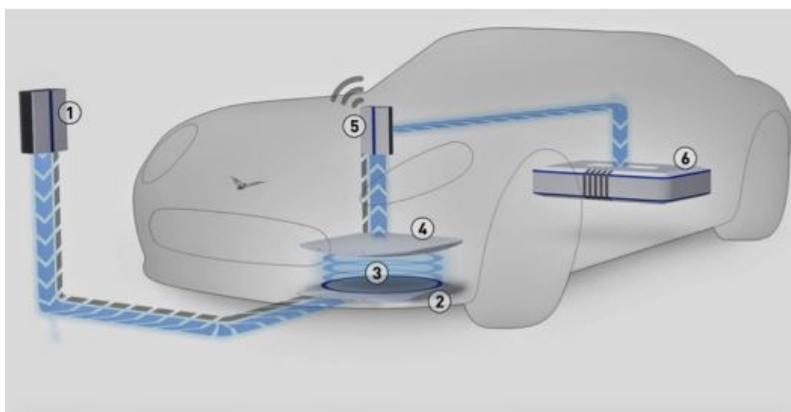


Figura 7: Ilustração do Carregamento sem fios de um EV

2.3 Parques de Estacionamento

Os automóveis passam 90% do seu tempo estacionados pelo que as cidades não podem prescindir de parques de estacionamento. Para as cidades, é de extrema importância que os condutores tenham espaços para estacionar. Dado que os automóveis são o principal meio de transporte, é necessário que estes espaços atendam às necessidades desses condutores: proximidade ao trabalho ou casa, custo de estacionamento adequado entre outros. O estacionamento pode ocorrer na rua ou em instalações próprias para o estacionamento. Se o estacionamento ocorrer na rua, será ao longo do passeio e está geralmente sujeito a restrições através de sinais de estradas. Por outro lado, o estacionamento em infraestruturas significa que o automóvel ficará parado num parque de estacionamento podendo este ser interior ou ao ar livre, público ou privado. Os diferentes designs de parques de estacionamento adaptam-se ao tipo de consumidor esperado. Estes tipos de parque de estacionamento podem ter diferentes caracteres: municipal, comercial ou privado.

Os parques comerciais atendem aos consumidores que procuram um lugar próximo aos serviços procurados, ao trabalho ou residência. Em primeiro lugar, os parques de superfícies comerciais (centros comerciais, ginásios, supermercados) atraem consumidores que procuram estacionamento próximo aos serviços procurados e de curta duração (inferior a 3 horas). Em segundo lugar, os consumidores que procuram estacionamentos mais prolongados

(superiores a 3 horas mas inferiores a 10 horas) encontram alternativas como garagens e parques de estacionamento com vários pisos. Por fim, existem parques para estacionamentos de longa duração como parques do aeroporto. Este tipo de parque obtém a suas receitas através do pagamento dos consumidores que pretendem estacionar os seus veículos. O consumidor pode ser transitório ou ter uma avença; no caso de ser o primeiro, o utilizador irá pagar o valor de acordo com uma tabela de preços por um estacionamento de curto prazo enquanto, no segundo caso, o utilizador usará uma credencial pagando um valor periodicamente de modo a usar o parque de forma contínua.

Os parques privados dividem-se pelos parques residenciais e parques de empresas que são ocupados por três tipos de consumidores: carros de trabalhadores, carros da frota e clientes ou visitantes.

À medida que se dá o progresso tecnológico em outras áreas, os consumidores exigem que os parques de estacionamento também se vão actualizando. Assim, têm surgido novos sistemas para melhorar o atendimento ao cliente como múltiplas opções de pagamento. Exemplos destas melhorias são uma aplicação de estacionamento pela qual o utilizador pode informar-se sobre o parque em tempo real, receber avisos de que o parquímetro está a expirar e fazer o pagamento através da aplicação como o ePark [31]. Uma das medidas de gestão é a adaptação aos veículos elétricos através da instalação de carregadores de modo a atrair novos utilizadores e adicionarem uma nova fonte de receitas. De modo a maximizar a satisfação do consumidor e minimizar os impactos na rede, os parques de estacionamento serão ideais para implementar estratégias de gestão do carregamento de EVs [32].

Segundo um estudo realizado pela Volkswagen [33], os custos associados às infraestruturas de carregamento dividem-se por: Construção e Instalação, Hardware e Custo Operacional anual. Estes custos variam consoante os requisitos postos na tecnologia de carregamento e no local onde serão instalados podendo variar significativamente. Os custos serão tanto maior quanto maior for a necessidade de adaptação do local pelo que se procura sempre fazer um estudo prévio. Em baixo, pode-se observar a tabela 1 que descrevem o intervalo de preços para os vários tipos de carregadores.

Tabela 1: Custos associados à instalação de Estações de Carregamento segundo a Volkswagen

	Wallbox	Charging Station	Fast Charger
Construção/Instalação/Conexão	€200 - 2000	€1500 - 3000	€16000 - 40000
Hardware	€300 - 1500	€3000 - 8000	€20000 - 75000
Custo Operacional por Ano	€0 - 350	€0 - 600	€900 - 2000

Atualmente, já existem diversos sistemas que pretendem melhorar o serviço prestado pelos parques de estacionamento. Um exemplo deste tipo de sistemas são as redes de sensores sem fios que permitem a deteção dos lugares ocupados e apresentar a percentagem de ocupação do parque [34]. Não se procuram soluções apenas na gestão do parque mas também na sua sustentabilidade, Masoud Honarmand et al. [35] propõem um método de programação dos recursos energéticos satisfazem os objetivos dos parques de estacionamento relativos ao carregamento dos EVs e garantem a fiabilidade do sistema energético. Adicionalmente, novos conceitos como Vehicle-to-Grid (V2G) e *Smart Grid* têm sido introduzidos para ajudar a acelerar o estudo de possíveis comunicações bidirecionais entre a rede de distribuição e os elementos técnicos integrados, tanto pode sem EVs como outros recursos.

2.4 Programação Inteira Mista

A técnica de otimização usada nesta dissertação para o problema de controlo de carregamento do EVs é Programação Inteira Mista, MIP. Esta técnica determinística permite gerar uma solução a partir da maximização (ou minimização) de uma função objetivo linear sujeita a um ou mais restrições com a existência de variáveis inteiras. Os problemas deste tipo descrevem-se matematicamente como Minimizar

$$z = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (1)$$

sujeito a

$$\mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \text{ (restrições lineares)}$$

$$l \leq \mathbf{X} \leq u \text{ (restrições de intervalo)} \quad (2)$$

Alguns ou todos os x_j devem ter valores inteiros

A integralidade das restrições permite que os modelos MIP capturem a natureza de variáveis como variáveis binárias (o seu valor apenas pode assumir 0 ou 1). Através destas variáveis, o modelo pode tomar decisões consoante o seu valor.

Uma vez que este tipo de problemas são não convexos, deve ser adotado um método sistemático para encontrar a solução. O método mais usado chama-se "Branch and Bound" que procura a solução ótima através do relaxamento das restrições. O consequente problema de programação linear será resolvido procurando uma solução ótima independente das restrições. Se a solução ótima cumprir todas as restrições, então a solução mantém-se. Caso contrário, o método irá escolher uma variável que não cumpra a restrição e formará um ramo através da criação de dois sub-problemas em que a variável se encontra com mais restrições. O processo é repetido até se encontrar uma solução que cumpra todas as restrições.

3 Metodologia

Este capítulo apresenta a metodologia proposta para resolver o problema de controlo do parque de estacionamento para diferentes cenários. O capítulo começa por descrever as ferramentas utilizadas para simulação e otimização. Em seguida, será feita a descrição do modelo implementado e a formulação matemática do mesmo.

3.1 Software de Simulação

Vários programas têm sido disponibilizados capazes de simular o comportamento do carregamento dos veículos elétricos ou desenvolver aplicações de otimização. Nesta secção serão descritos os três programas usados para simular os parques de estacionamento e os seus comportamentos.

EXCEL: O Microsoft Excel é um programa com folhas de cálculo que permite a organização de informação e possui ferramentas de cálculo. Neste trabalho será usado para: definir os parâmetros da simulação, as informações relativas às regras do parque e os valores de cada fator de penalização, os dados sobre a arquitetura de carregamento e as características de cada veículo estacionado. O ficheiro Excel também será usado para escrever os valores da função objetivo, da variável minSOC, da evolução do estado da bateria de cada veículo elétrico e da potência injetada em cada veículo.

MATLAB: O MATLAB é uma plataforma de programação desenhada para engenheiros e cientistas. Através da linguagem de programação MATLAB é possível fazer manipulações de matrizes, analisar dados, desenvolver algoritmos e criar modelos e aplicações. O MATLAB será usado para ler o ficheiro EXCEL, realizar os cálculos prévios de variáveis relevantes ao modelo e que entram no programa de otimização e escrever os resultados no mesmo ficheiro EXCEL.

GAMS: O GAMS (abreviação para General Algebraic Modeling System) é um sistema de modelagem para programação e otimização matemática. O GAMS foi desenhado para modelar e solucionar problemas de otimização diversos. Neste trabalho será usado para otimizar o carregamento dos EVs num problema de programação inteira mista usando o solver CPLEX.

O algoritmo de programação irá ser executado na plataforma MATLAB começando pela leitura do Excel, de onde retira todas as informações relativas ao parque de estacionamento, aos carregadores e aos EVs. De seguida, para cada período, serão calculados os limites de potência do parque e dos carregadores. De seguida, o programa avalia se os EVs estão ligados a carregadores e realiza todos os cálculos prévios necessários para o carregamento dos veículos. Posteriormente, o MATLAB vai chamar o sistema GAMS que fará a otimização do modelo para cada período e retorna o valor da função objetivo, da potência carregada em cada EV e o menor valor de bateria (em percentagem) entre todos os EV. Por fim, o programa irá escrever os resultados da otimização no Excel.

3.2 Função Objetivo

Nesta subsecção, apresenta-se a formulação matemática do controlador proposto para o parque de estacionamento. Partindo da perspetiva da utilização do parque, foram desenvolvidas regras de gestão do sistema e limitações técnicas de modo a garantir o carregamento equilibrado de todos os veículos estacionados. As regras do parque são aplicadas por penalizações que o modelo tenta reduzir através da otimização das variáveis do problema. Assume-se que a potência máxima disponível para o carregamento de EVs é a capacidade máxima do parque de estacionamento a qual pode ser definida pelas características técnicas ou contratualmente. Dado que se aplicam penalizações, observou-se que o problema de carregamento dos Veículos elétricos é um problema de programação inteira mista porque, em primeiro lugar, o modelo vai estar restringido pelas regras do parque e limitações técnicas e porque se testemunhou a integralidade de algumas variáveis deste problema. A complexidade do modelo deve-se aos desafios associados à integração em larga escala de EVs.

O modelo proposto procura minimizar as penalizações da função objetivo (F_{OBJ}) definidas de acordo com as regras do parque de estacionamento e é obtida por

$$F_{OBJ} = t \left(\begin{aligned} & \sum_{CS=1}^{N_{CS}} (P_{CS(CS)} * \eta_{CS}) + \sum_{EV=1}^{N_{EV}} (PF_{MCP(EV,t)} * P_{minMCP(EV,t)}) \\ & + \sum_{EV=1}^{N_{EV}} (PF_{SocL1(EV,t)} * P_{L1N(EV,t)}) + \sum_{EV=1}^{N_{EV}} (PF_{SocL2(EV,t)} * P_{L2N(EV,t)}) \\ & + \sum_{EV=1}^{N_{EV}} (PF_{SocL3(EV,t)} * P_{L3N(EV,t)}) + \sum_{EV=1}^{N_{EV}} (PF_{VarP(EV,t)} * \Delta P_{ch(EV,t)}) \\ & + PF_{minSOC(t)} * minSOC(t) \end{aligned} \right) \quad (3)$$

onde, em cada período, t , o controlador fará a otimização do carregamento dos EVs segundo o peso das penalizações de cada veículo elétrico. O termo η_{CS} representa a eficiência do carregamento de cada carregador. Uma vez que se pretende otimizar o controlo do carregamento de vários EVs simultaneamente, assume-se que esta eficiência de todos os carregadores será de 95%. O primeiro parâmetro da função objetivo representa a potência útil entregue por cada carregador por período e tem como objetivo limitar a energia entregue. O segundo termo representa a penalização do carregamento mínimo em que a primeira parcel é um fator de penalização que é multiplicado pela variável P_{minMCP} que é atualizada durante a otimização. Associado à função objetivo estão as penalizações associadas aos níveis de bateria de cada EV. Adicionalmente, tem-se em conta a penalização da variação da potência de carregamento e do menor valor de baterias do parque. A potência usada pelo parque de estacionamento e cada carregador também é penalizada para prejudicar os períodos de ponta em favor de períodos vazios.

3.3 Regras do Parque

De acordo com as regras do parque de estacionamento, vários tipos de restrições e penalizações podem ser aplicadas. Estes valores também podem variar consoante o EV e o período atribuindo maior flexibilidade ao sistema de gestão. Através deste tipo de abordagem é possível atingir um melhor nível de gestão com definições dinâmicas das penalizações e que garante um carregamento equilibrado para os veículos elétricos estacionados no parque de estacionamento.

Ao estar ligado ao carregador, espera-se que o EV esteja a receber energia. Assim, um dos objetivos do controlador é garantir que qualquer EV seja carregado com pelo menos a potência mínima, $P_{minMCP(EV,t)}$ em cada período. Este valor é subjetivo à gestão do parque pelo que se definiu como 2kW. Esta variável só toma valores inferiores a 2kW caso a necessidade de carregamento do EV seja inferior a esse valor (período em que a bateria fica totalmente carregada).

$$P_{minMCP(EV,t)} - PF_{MCP(EV,t)} \leq P_{ch(EV,t)} \quad (4)$$

$$P_{minMCP(EV,t)} = \min \left(2kW; \left(1 - SOC_{(EV,t)} \right) * \frac{E_{maxEV(EV,t)}}{t_{period}} \right) \quad (5)$$

Adicionalmente, não se pretende apenas garantir que todos os EVs sejam carregados durante qualquer período. As penalizações definidas em 6 procuram aumentar a importância de carregar os veículos com menores valores de bateria pelo que serão considerados três níveis. O primeiro corresponde ao nível em que os veículos elétricos apresentam percentagens mais críticas de baterias, deste modo todos os veículos com carga de bateria (em percentagem) inferiores ao limite do primeiro nível têm prioridade. Este limite estará geralmente entre 40% a 60% da bateria do EV. O segundo nível corresponderá ao veículos cuja bateria é superior ao limite superior do primeiro nível e inferior ao limite inferior do terceiro nível, estes EVs devem ser menos prioritários do que os EVs do primeiro nível pelo que o valor de penalização também deve ser inferior à penalização do primeiro nível. O terceiro nível correspondem aos EVs com a bateria mais carregada, logo menos prioritários e menos penalizados. Estes veículos já apresentam níveis de bateria suficientes para o uso normal sendo que todos os veículos com baterias superiores a 85% se encontram neste nível. Complementarmente, o parque de estacionamento tem uma opção de estudo em que é possível identificar um veículo como VIP. Neste caso, os veículos serão considerados prioritários

em relação aos restantes tendo um fator de penalização extra.

$$\begin{aligned}
P_{SocL1(EV,t)} - PF_{SocL1(EV,t)} &\leq P_{ch(EV,t)} \\
P_{SocL2(EV,t)} - PF_{SocL2(EV,t)} &\leq P_{ch(EV,t)} \\
P_{SocL3(EV,t)} - PF_{SocL3(EV,t)} &\leq P_{ch(EV,t)}
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
P_{SocL1(EV,t)} - PF_{SocL1(EV,t)} + P_{SocL2(EV,t)} - PF_{SocL2(EV,t)} + P_{SocL3(EV,t)} \\
- PF_{SocL3(EV,t)} \leq P_{ch(EV,t)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{SocL1(EV,t)} &= \max \left(0; (0.4 - SOC_{(EV,t)}) * \frac{E_{maxEV(EV,t)}}{t_{period}} \right) \\
P_{SocL2(EV,t)} &= \max \left(0; (0.85 - SOC_{(EV,t)}) * \frac{E_{maxEV(EV,t)}}{t_{period}} \right) \\
P_{SocL3(EV,t)} &= \max \left(0; (1 - SOC_{(EV,t)}) * \frac{E_{maxEV(EV,t)}}{t_{period}} \right)
\end{aligned} \tag{7}$$

De modo a promover a continuidade do carregamento e limitar as variações de potência durante o carregamento para períodos consecutivos propõe-se a penalização PF_{VarP} definida em 8. Deste modo, a limitação só ocorre em momentos em que a potência de carregamento decresce.

$$P_{Ch(EV,t-1)} - P_{Ch(EV,t)} + PF_{VarP(EV,t)} \leq \Delta P_{ch(EV,t)} \tag{8}$$

A última regra do parque pretende priorizar os veículos com o menor nível de bateria através de uma penalização. A diferença deste fator de penalização em relação aos restantes é expressar-se em percentagem e não em Potência uma vez que depende diretamente de uma variável min_SOC . O veículo com a bateria mais descarregada terá sempre prioridade em relação a qualquer outro EV.

$$PF_{minSOC(t)} \leq SOC_{(EV,t)} \tag{9}$$

Por fim, antes de ocorrer a otimização do modelo, o programa irá calcular a energia necessária o carregamento de cada EV em cada nível e também os valores de cada fator de penalização.

Além das regras de gestão do parque, o modelo de otimização também deve ter em conta as limitações técnicas associadas aos parques de estacionamento. Dado que o parque de estacionamento é uma infraestrutura, tem uma capacidade associada aos seus componentes técnicos. Assim, a potência máxima usada deve ser sempre igual ou inferior à capacidade do parque de estacionamento, esta capacidade pode ser limite técnico ou um limite contratual. O limite de potência pode variar de período para período para replicar também o digrama de carga natural e é aplicado aos carregadores.

$$\sum_{CS=1}^{N_{CS}} P_{maxCSt(CS,t)} \leq P_{maxPark(t)} \tag{10}$$

Adicionalmente, o carregador também apresenta as suas próprias limitações técnicas. Assim, a potência entregue pelo carregador CS deve ser inferior à capacidade máxima do carregador, $P_{maxCS(CS)}$, e inferior ao máximo definido pelo sistema de gestão do parque. Estas limitações podem ser vistas nas equações 11 e 12. A variável X_{EV} informa o modelo se o veículo elétrico se encontra ligado ao carregador CS no período t .

$$\sum_{EV=1}^{N_{EV}} P_{ch(EV,t)} * X_{Place(EV,CS,t)} \leq P_{maxCS(CS)} \tag{11}$$

$$\sum_{EV=1}^{N_{EV}} P_{ch(EV,t)} * X_{Place(EV,CS,t)} \leq P_{maxCSt(CS,t)} \tag{12}$$

Tal como nos dois casos anteriores, os EVs apresentam limitações técnicas durante o carregamento das suas baterias. Em primeiro lugar, para cada EV, a potência de carregamento deve ser inferior à potência máxima aceite pelo veículo. Também se pode considerar que os EVs não permitem carregamentos com potência inferiores a um limite, diferentes para cada EV e podem depender do estado da bateria do veículo e prevenir a degradação da mesma.

$$\begin{aligned}
 P_{ch(EV,t)} &\leq P_{maxCh(EV,t)} * X_{Ch(EV,t)} \\
 P_{ch(EV,t)} &\geq P_{minCh(EV,t)} * X_{Ch(EV,t)} \\
 P_{ch(EV,t)} &\leq (1 - SOC_{(EV,t)}) * \frac{E_{maxEV(EV,t)}}{t_{period}}
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Finalmente, qualquer EV apresenta uma restrição associada com a transferência de energia. Para cada EV, a energia disponível no final do período, $E_{f(EV,t)}$ deve ser igual à soma da energia disponível no início do período com a energia entregue pelo carregador ao EV durante esse período. Adicionalmente, tem-se de verificar que a energia final de cada EV seja igual ou inferior à capacidade da bateria desse mesmo EV durante toda a simulação.

$$E_{f(EV,t)} = E_{i(EV,t)} + P_{ch(EV,t)} \tag{14}$$

$$E_{f(EV,t)} \leq E_{maxEV(EV)} \tag{15}$$

4 Casos de Estudo

Este capítulo apresenta os casos de estudos que demonstram a aplicabilidade da metodologia proposta nesta dissertação. Em primeiro, apresenta-se a descrição e características de cada caso de estudo, também se descrevem as especificações usadas para os casos de estudo. Depois é feita uma análise individual a cada caso de estudo e, por fim, será feita uma análise dos resultados para cada caso de estudo.

4.1 Descrição dos Cenários

Como mencionado anteriormente, a metodologia proposta assume a responsabilidade da gestão e operação dos carregadores instalados no parque de estacionamento. Assim, os casos de estudo têm em consideração a adoção em larga escala de EVs e as limitações técnicas associadas. De modo a obter um conjunto de dados mais amplo, optou-se por criar várias hipóteses para parques de estacionamento com diferentes números de lugares em que se variam o número de carregadores disponíveis. A Tabela 2 apresenta as características dos casos de estudo que podem ser diferenciados pela rede de distribuição, o número e duração dos períodos e o número de veículos a carregar no parque de estacionamento. Os critérios para avaliar o desempenho estão também expostos na Tabela 2.

Tabela 2: Caracterização dos Casos de Estudo

Características	Caso de Estudo 1	Caso de Estudo 2	Caso de Estudo 3
Problema de Otimização	Min(FunObj) - Programação Inteira Mista		
Rede de Distribuição	Rede com Um Ponto de Interligação e 1 Fonte de Energia Externa		
Número de Períodos	24-48	24	576
Duração dos Períodos	5 minutos		
Parque de estacionamento (lugares)	5-6	10	100
Análise	Carregadores Centralizados vs Carregadores Individuais	Utilizadores Premium (VIP)	Investimento, VIP, Gestão de Parques
Crítérios	Estado da Bateria dos EVs, Energia Efetiva, Valor da FunObj e da minSOC		

De forma lógica, quanto menor for o valor da função objetivo, melhor deverá ser o desempenho uma vez que o controlador está a minimizar as penalizações existentes no parque de estacionamento. O desempenho pode ser avaliado tendo em conta o estado da bateria de cada veículo elétrico. Por fim, também se tem em conta a energia distribuída entre os vários carregadores CS e o menor valor de bateria existente no parque de estacionamento.

O Caso de Estudo 1 é um problema de otimização da função 'Min(FunObj)' que se refere à aplicabilidade da metodologia proposta no capítulo anterior. Como indicado na Tabela 2, este caso de estudo considera uma rede de distribuição de energia bastante simples com apenas um ponto de interligação com a rede, uma fonte de energia com capacidade até 41 kW e usará a técnica MIP proposta para otimizar o modelo. Durante o estudo, variou-se o número de períodos de 24 a 48 para parques de estacionamento com 5 a 6 lugares que podem estar ocupados durante a simulação. O Caso de Estudo 1 tem como objetivo comparar o desempenho entre carregadores centralizados versus carregadores individuais de modo a identificar a melhor solução para os Casos de Estudo 2 e 3.

O Caso de Estudo 2 também é um problema de otimização da função 'Min(FunObj)' que considera a mesma rede de distribuição do caso de estudo anterior. A técnica MIP proposta irá otimizar o modelo aplicado a um parque de estacionamento com 10 lugares e com 24 períodos de simulação. O objetivo deste caso de estudo é analisar a opção de utilizadores 'premium' que investem para terem um melhor serviço de carregamento, neste caso, traduz-se pela adição de uma penalização adicional nos EVs designados como VIP. Adicionalmente, procurou-se entender as consequências da existência de VIPs na qualidade do serviço prestado a todos os EVs estacionados no parque de estacionamento.

O Caso de Estudo 3 aplica a metodologia proposta a parques de estacionamento mais complexos nos quais se pretende fazer uma adoção em larga escala de EVs. Estas infraestruturas irão ter 100 lugares pelo que a necessidade de otimização é bastante superior aos casos de estudo anteriores. Inicialmente, estudou-se o impacto das regras de gestão do parque. Depois, implementou-se diferentes arquiteturas que permitam a adaptação dos parques de estacionamento a uma nova realidade minimizando o impacto das limitações técnicas. Em seguida, estuda-se a opção de utilizadores premium para os cenários recomendados. Por fim, retira-se conclusões das simulações e dados obtidos. Neste caso, os EVs estacionados ao longo da simulação estão agrupados em diferentes tipos de utilizadores sendo que as suas características são baseadas em EVs presentes no mercado como já foi referenciado na subsecção dos Veículos Elétricos. O método proposto não só será avaliado consoante os critérios estabelecidos anteriormente mas também pelo investimento necessário em infraestruturas técnicas como carregadores.

Como foi referido em cima, os casos de estudo são compostos por uma rede de distribuição. Adicionalmente, a metodologia proposta apenas faz a gestão do carregamento no parque de estacionamento, pelo que a rede de distribuição não é objeto de controlo nesta dissertação. Assim, os casos de estudo usam uma rede de distribuição com um grau de complexidade muito baixo apresentando apenas uma fonte de energia externa.

4.2 Caso de Estudo 1

Este caso de estudo refere-se à metodologia proposta na secção 3 que procura uma solução para o problema 'Min(FunObj)'. O objetivo deste caso de estudo é avaliar a efectividade da metodologia proposta e analisar o desempenho tanto de carregadores centralizados como carregadores individuais consoante os critérios estabelecidos na Tabela 2. Este caso de estudo terá em conta a rede de distribuição descrita anteriormente.

Após esta parte introdutória em que se apresenta o objetivo do primeiro Caso de Estudo, estudou-se o carregamento de EVs em parques de estacionamento para três cenários diferentes:

- Simulação de um parque de estacionamento com 5 lugares durante 24 períodos;
- Simulação de um parque de estacionamento com 6 lugares durante 24 períodos;
- Simulação de um parque de estacionamento com 6 lugares durante 48 períodos.

No último cenário, pretende-se entender o impacto da entrada e saída de veículos no carregamento dos veículos e no modelo proposto. Para cada cenário, existem diferentes arquiteturas de carregamento que permitiram avaliar o desempenho entre os vários desenhos de carregadores. Após a apresentação dos dados recolhidos durante as simulações, são retiradas algumas conclusões.

4.2.1 Análise Estatística - CE1

Para qualquer cenário neste caso de estudo existem parâmetros que se mantiveram constantes durante a simulação. Em primeiro lugar, haverá penalização para períodos pertencentes ao horário de ponta (intervalo entre os períodos 19 e 22). Em seguida, a mínima potência que um EV pode receber é de 2kW por período sendo que a variação máxima da potência de carregamento é de 5kW. Depois, os limites definidos para o nível 1 é 40% da bateria do EV, o limite superior do nível intermédio é 85% sendo que nível 3 terá como limite 100%, isto é, uma bateria totalmente carregada. Por fim, embora a capacidade de cada EV possa variar, a potência máxima de carregamento não será limitada evitando a existência de mais uma limitação técnica. O primeiro cenário a ser estudado é o parque de estacionamento com 5 lugares disponíveis como referido anteriormente. Para este cenário foram consideradas quatro hipóteses de arquitetura de carregamento:

- Hipótese 1 - 1 Carregador - 22kW - responsável por carregar os 5 lugares;

- Hipótese 2 - 2 Carregadores - 8.8kW e 13.2kW - o carregador com 8.8kW é responsável por carregar 2 lugares enquanto o carregador com 13.2kW de capacidade carrega os restantes 3 lugares;
- Hipótese 3 - 3 Carregadores - 8.8kW e 4.4kW - dois carregadores de 8.8kW em que cada carregador é responsável pelo carregamento de 2 lugares, respetivamente, e o carregador de 4.4kW carrega apenas um lugar;
- Hipótese 4 - 6 Carregadores - 4.4kW - cada carregador será responsável pelo carregamento de um lugar.

Neste cenário, o parque de estacionamento irá ter 5 EVs estacionados ao longo da simulação sendo que apenas 2 EVs se encontram a carregar no primeiro período. O carregamento dos restantes EVs começa nos períodos 5, 10 e 20 respetivamente. O estado de bateria inicial de cada EV será de 40% excepto do EV 2 que tem 45% da bateria carregada. De modo a aumentar a complexidade da situação, a capacidade da bateria dos EV vai variar entre 20kWh (EV 4), 40kWh (EV 1, 3 e 5) e 60kWh (EV 2). Estes dados poderam ser observados na Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização dos EVs para um Parque de Estacionamento de 5 Lugares

EV	Max. Cap [KWh]	Entrada	Saída	Duração do Estacionamento	SOCi [%]
1	40	1	24	24	40
2	60	10	24	15	45
3	40	20	24	5	40
4	20	5	24	20	40
5	40	1	24	24	40

A análise dos dados obtidos em relação à Função Objetivo e à variável 'minSOC' será feita depois da exposição das quatro hipóteses para este caso de estudo.

Aplicando este cenário à Hipótese 1, obteve-se a seguinte evolução do estado da bateria dos EVs no parque de estacionamento (Figura 8a).

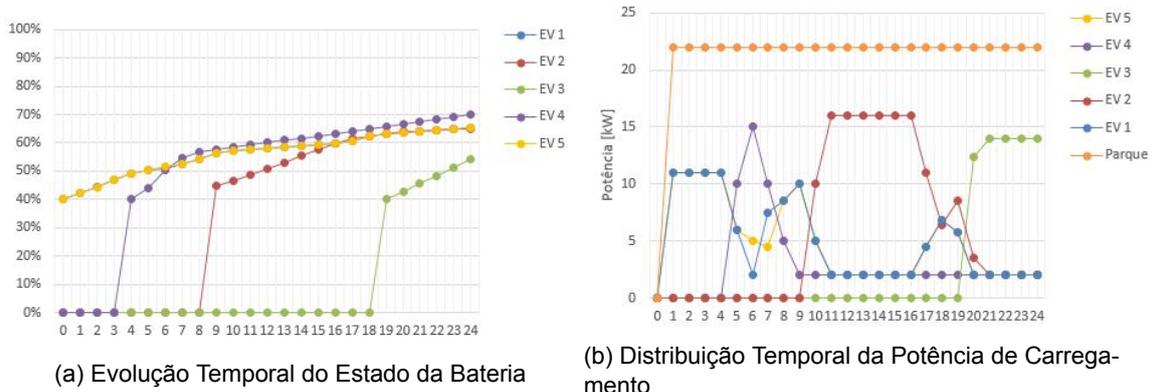


Figura 8: Gráficos da Hipótese 1 - 5 Lugares

Nesta figura, pode-se observar as diferentes entradas de cada EV bem como a tendência do carregamento destacando-se que o EV 1 e o EV 5 (na figura a linha do EV 5 sobrepõe a linha do EV 1) apresentam sempre o mesmo valor de bateria excepto no período 6 a qual é explicada pela distribuição de energia durante esse período. Como se pode ver na Figura 8b, a potência entregue no carregamento do EV 1 é 3kW inferior à potência entregue ao EV 5. No entanto, no período 7, esta diferença anula-se uma vez que a potência de carregamento do EV 1 é 7,5kW enquanto que para o EV 5 é 4,5kW. Também é possível verificar que os EVs apresentam valores de bateria finais dentro do nível 2 pelo que seria recomendado a continuação do carregamento até atingir um estado suficiente para o uso normal.

Como seria de esperar, cada vez que começa o carregamento de um EV e este apresenta um valor de bateria menor em relação aos restantes, vai haver um incentivo em forma de energia no carregamento deste EV. Deste modo, observa-se que nos intervalos dos períodos de 5 a 7, de 10 a 17 e de 20 a 24, existe uma maior injeção de energia nos EVs 4, 2 e 3, respetivamente. Esta observação revela-se na Figura 8b pelos picos apresentados pelos EVs referenciados neste parágrafo. Após os valores de bateria estarem percentualmente próximos, a distribuição de energia pelo carregador tende a levar a um crescimento equitativo entre os EVs. Assim, os EVs com menor capacidade irão receber carregamentos mais baixos em termos de potência mas terão um crescimento percentual semelhante aos restantes EVs como é o caso do EV 4. Embora a potência disponível no parque de estacionamento varie entre 40 e 50kW, existe uma limitação técnica associada ao carregador que só permite a transferência de potência até 22kW. Deste modo, para apresentar o melhor desempenho, irá distribuir esta potência pelos EVs a carregar durante todos os períodos.

Por fim, no final dos 24 períodos, os EVs apresentam os seguintes valores de bateria:

Tabela 4: Estado de Bateria Final - Hip. 1 - 5 Lugares

EV	SOCf [%]	Δ SOC [%]
1	65,42	25,41
2	64,34	19,94
3	54,26	14,26
4	70	30
5	65,42	25,41
Valor Médio [%]	64	

Os valores das baterias dos veículos apresentam uma média de 64%, 23% superior em relação ao valor inicial. A diferença entre os veículos com maior, EV 4, e menor, EV 3, valores de bateria é cerca de 16%. Adicionalmente, os restantes EVs apresentam um SoC na ordem dos 65%. Ao longo dos 24 períodos, foi entregue um total de 44kWh pelo carregador.

Aplicando o cenário à Hipótese 2, obteve-se a seguinte evolução do estado da bateria dos EV no parque de estacionamento (Figura 9a).

Nesta hipótese, a dispersão entre os valores da bateria dos EVs será maior devendo-se à presença de dois carregadores, o primeiro com 8,8kW e o segundo com 13,2kW. Uma vez que a capacidade do parque de estacionamento está dividida entre os dois carregadores, surge mais uma limitação técnica uma vez que cada carregador não pode exceder a sua capacidade máxima. Deste modo, esta hipótese mostra-se mais restringida em termos de distribuição de potência. O veículo 4 mostra ser o veículo com melhor estado de bateria novamente enquanto que o EV 3 apresenta o valor mais baixo devido ao menor intervalo de carregamento.

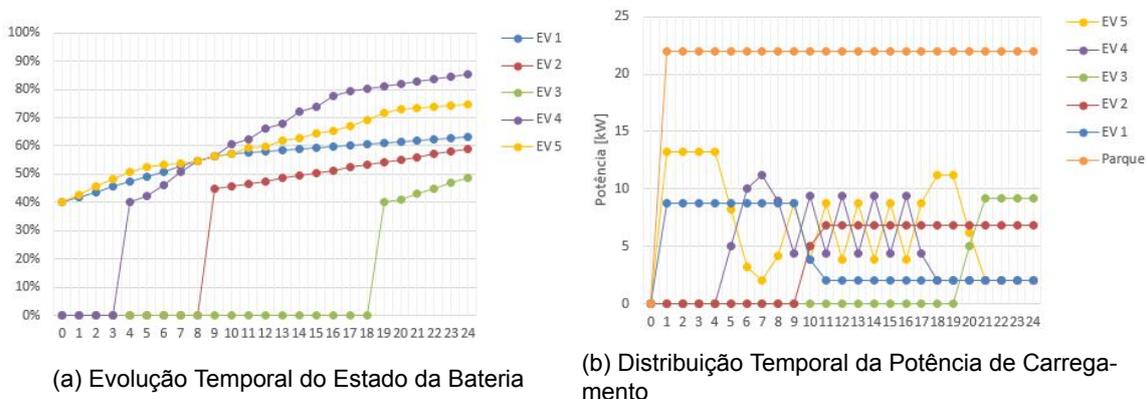


Figura 9: Gráficos da Hipótese 2 - 5 Lugares

A situação descrita no parágrafo anterior é confirmada pela Figura 9a em que o carregador de 8,8kW apresenta duas tendências de carregamento ao longo da simulação. Em primeiro lugar, enquanto o EV 2 não se encontra no parque de estacionamento o carregador distribuiu toda a sua potência para o EV 1. De seguida, com o início do carregamento do EV 2, a potência será distribuída entre os dois EVs sendo que a prioridade irá para o segundo veículo elétrico. Um situação semelhante acontece ao segundo carregador que ao longo da simulação irá distribuir energia pelos restantes EVs. Na próxima figura, pode-se observar que independentemente da diferente arquitetura, o parque de estacionamento entrega sempre os 22kW.

No final dos 24 períodos, os EVs apresentam os seguintes valores de bateria:

Tabela 5: Estado de Bateria Final - Hip. 2 - 5 Lugares

EV	SOCf [%]	Δ SOC [%]
1	63,13	23,13
2	58,92	13,92
3	48,71	8,71
4	85,33	45,33
5	74,63	34,63
Valor Médio [%]	66	

Os valores das baterias carregadas dos EVs apresentam um valor médio de 66%, 25% superior em relação ao valor médio inicial dos EVs. A diferença entre o EV com maior percentagem de bateria e o EV com menor percentagem de bateria é aproximadamente 37%. Adicionalmente, os restantes veículos apresentam valores bastantes dispersos. Tal como na hipótese anterior, ao longo dos 24 períodos, os dois carregadores entregaram um total de 44kWh aos EVs.

Aplicando o cenário à Hipótese 3, obteve-se a seguinte evolução do estado da bateria dos EVs no parque estacionamento (Figura 10a):

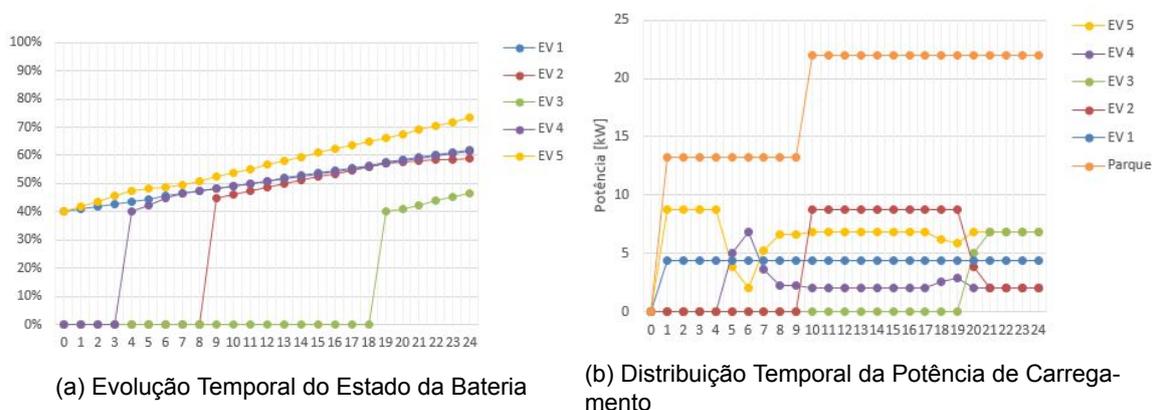


Figura 10: Gráficos da Hipótese 3 - 5 Lugares

Na figura em cima, observa-se que o EV 1 tem um carregamento contínuo em que cada período recebe 4,4kW uma vez que está ligado a um carregador individual. Nesta hipótese, a capacidade total do parque está dividida entre os três carregadores apresentado mais uma limitação técnica em relação à Hipótese 2. O facto de ter um carregador individual reduz a capacidade de otimização uma vez que este tipo de carregador funciona como uma variável binária que apenas apresenta dois modos de funcionamento: ativo, quando entrega a sua potência nominal inteiramente e desativo, quando não carrega nenhum EV.

A Figura 10b apresenta um comportamento interessante uma vez que durante os primeiros 9 períodos, apenas 60% dos 22kW disponíveis no conjunto dos três carregadores. Esta fator leva a que durante a simulação inteira, o parque de estacionamento apenas injeta aproximadamente 18,7kWh durante os 24 períodos.

No final dos 24 períodos, os EVs apresentam o seguinte estado de bateria:

Tabela 6: Estado de Bateria Final - Hip. 3 - 5 Lugares

EV	SOCf [%]	Δ SOC [%]
1	62	22
2	58,86	13,92
3	46,71	6,71
4	61,39	21,39
5	73,31	33,31
Valor Médio [%]	60	

O valor médio das baterias dos EVs é de 60%, 19% superior ao valor médio inicial. Para esta hipótese, a diferença entre o EV com maior valor de bateria, EV 5, e o menor valor de bateria, EV 3, é de aproximadamente 26%. Os restantes EVs apresentam valores próximos de 60% .

A última hipótese, Hip. 4, consiste em um carregador individual de 4,4kW para cada lugar. Para esta hipótese obteve-se o seguinte gráfico da evolução temporal da bateria dos EVs (Figura 11a).

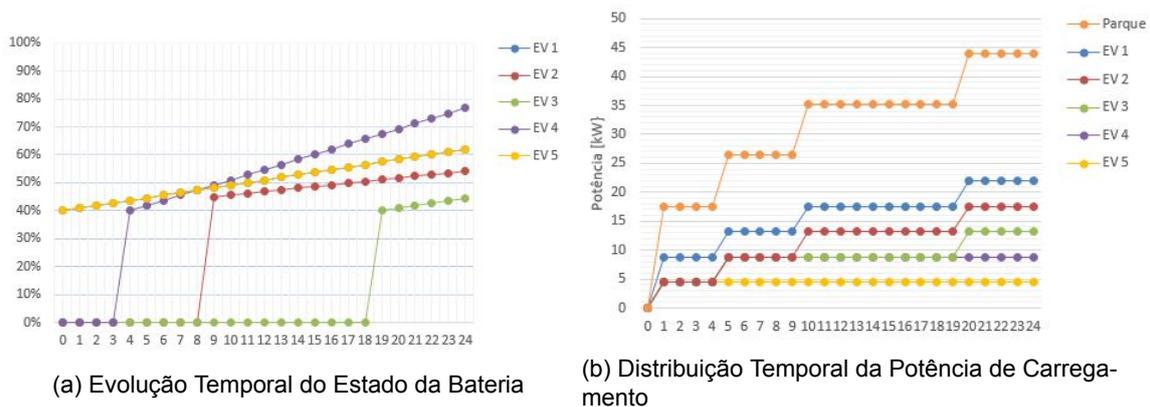


Figura 11: Gráficos da Hipótese 4 - 5 Lugares

A complexidade de otimização desta hipótese é muito reduzida uma vez que cada carregador irá ter um comportamento binário como explicado anteriormente. Deste modo, quando um EV se liga a um carregador, irá receber constantemente 4,4kW durante o intervalo de carregamento.

Como na hipótese anterior, o parque de estacionamento irá injectar apenas parte da sua potência total disponível durante vários períodos da simulação, até que todos os carregadores estejam em funcionamento. A cada carregador está associada 20% da carga disponível no sistema completo de carregamento, pelo que na Figura 11b pode-se observar um efeito de degraus à medida que os carregadores se ativam.

Inicialmente, o parque usa 40% da sua potência disponível para carregamento. No período 5 e 10, esta aumenta para 60% e 80%, respetivamente. Por fim, atinge o seu potencial máximo quando o último carregador se ativa no período 20. Estas limitações associadas aos carregadores individuais levam a que o parque de estacionamento da Hipótese 4 injete o menor valor de potência para o primeiro cenário, 16,13kWh.

No final dos 24 períodos, os EVs apresentam o seguinte estado de bateria:

Tabela 7: Estado de Bateria Final - Hip. 4 - 5 Lugares

EV	SOCf [%]	Δ SOC [%]
1	62	22
2	54,17	9,17
3	44,58	4,58
4	77	36,67
5	62	22
Valor Médio [%]		60

A hipótese 4 apresenta um valor final médio das baterias de 60%, 19% superior ao valor inicial. O veículo mais carregado é o EV 4 com 77% enquanto que o EV 3 apenas carregou 4,58% da sua bateria. Por fim, a dispersão entre o maior e menor valor de bateria é superior a 30%.

Os outros critérios de desempenho para o cenário de um parque de estacionamento com 5 lugares são a progressão da Função Objetivo (Figura 12 e o valor da variável 'minSOC' (Figura 13).

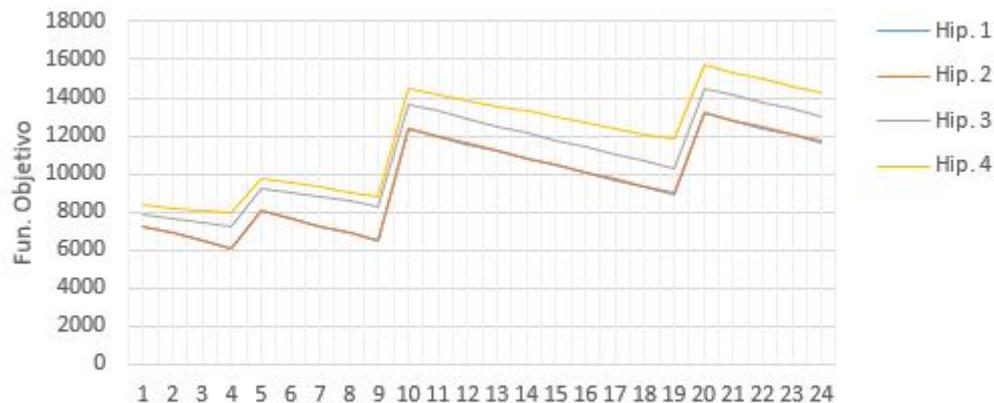


Figura 12: Progressão da Função Objetivo - 5 Lugares

Na figura em cima, podemos ver a progressão da função objetivo para cada hipótese. Lembra-se que o objetivo do método proposto é minimizar o valor das penalizações, ou seja, o valor desta função objetivo em cada período. Observa-se que a Hipótese 4 apresenta sempre os valores mais elevados em todos os períodos estando bastante afastado do nível de otimização das restantes hipóteses. Embora a Hipótese 3 apresente um melhor desempenho do que a Hip. 4, os seus valores mantêm-se bastante afastados do desempenho apresentado pelas duas hipóteses que apresentam carregadores mais centralizados. Em relação às duas primeiras hipóteses, evidencia-se que os seus valores são idênticos. Numa análise mais profunda identifica-se que a Hipótese 1 apresenta valores menores em todos os períodos excepto nos períodos 8 e 9. Adicionalmente, as penalizações do início do carregamento de um novo EV tendem em ser semelhantes para todos as hipóteses embora as Hipóteses 1 e 2 tenham mais recursos para encontrar uma melhor solução no longo-prazo. Na Figura 13, observa-se o menor valor de bateria, minSOC, presente no parque de estacionamento para cada hipótese por período. Esta variável apresenta um comportamento contrário à progressão do valor da função objetivo uma vez que à medida que o último diminui, a variável 'minSOC' aumenta. Observa-se que as Hipóteses 3 e 4 são as únicas hipóteses que apresentam o menor valor de bateria quando se faz a comparação entre hipóteses. Também se observa que à medida que ocorre a otimização sem alterações no parque de estacionamento, o valor da variável 'minSOC' para a Hipótese 1 irá destacar-se tendo um crescimento mais acelerado.

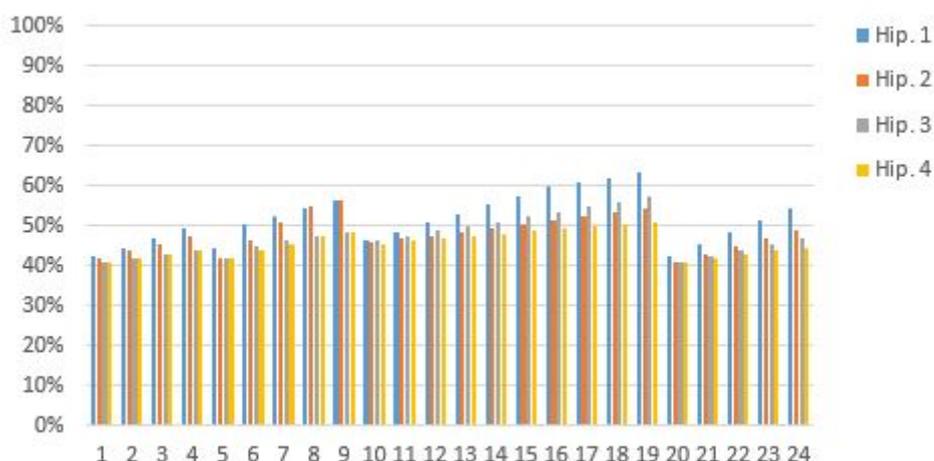


Figura 13: Valores da variável minSOC por Período - 5 Lugares

O segundo cenário a ser estudado é o parque de estacionamento com 6 lugares disponíveis e pretende-se testar uma situação com mais EVs. Para este cenário estudaram-se duas situações distintas: em primeiro lugar, os EVs apenas têm um período de estacionamento e a simulação tem a duração de 24 períodos; em segundo lugar, a simulação tem 48 períodos e os EVs podem sair do parque de estacionamento para dar lugar a outros EVs. Para ambas as situações, também foram consideradas quatro hipóteses de arquitetura de carregamento:

- Hipótese 1 - 1 Carregador - 22kW - responsável por carregar os 6 lugares;
- Hipótese 2 - 2 Carregadores - 11kW - cada carregador é responsável por carregar 3 lugares;
- Hipótese 3 - 3 Carregadores - 7,3kW - cada carregador de 7,3kW irá carregar apenas 2 EVs;
- Hipótese 4 - 6 Carregadores - 3,7kW - haverá um carregador individual para cada lugar.

Procura-se criar uma situação semelhante ao parque de estacionamento de 5 lugares. Logo, para a primeira situação, o parque de estacionamento irá ter os 6 EVs estacionados ao longo da simulação sendo que apenas 2 destes EVs se encontram a carregar a partir do primeiro período. O carregamento dos restantes EVs começa nos períodos 5, 10 e 20 respetivamente. O estado inicial das baterias de cada EV será de 40% excepto para o EV 2 que tem 45% da bateria carregada e o EV 6 que tem 30% da bateria carregada. De modo a aumentar a complexidade da situação, a capacidade da bateria dos EV vai variar entre 25kWh (EV 4), 40kWh (EV 1, 3, 5 e 6) e 60kWh (EV 2). Estes dados poderão ser observados na Tabela 8.

Tabela 8: Caracterização dos EVs para um Parque de Estacionamento de 6 Lugares - 24 Períodos

EV	Max. Cap [KWh]	Entrada	Saída	Duração do Estacionamento	SOCi [%]
1	40	10	24	15	40
2	60	10	24	15	45
3	40	20	24	5	40
4	25	5	24	20	40
5	40	1	24	24	40
6	40	1	24	24	30

Aplicando esta situação à Hipótese 1, obteve-se a seguintes evolução temporal do estado da Bateria dos EVs (Figura 14a).

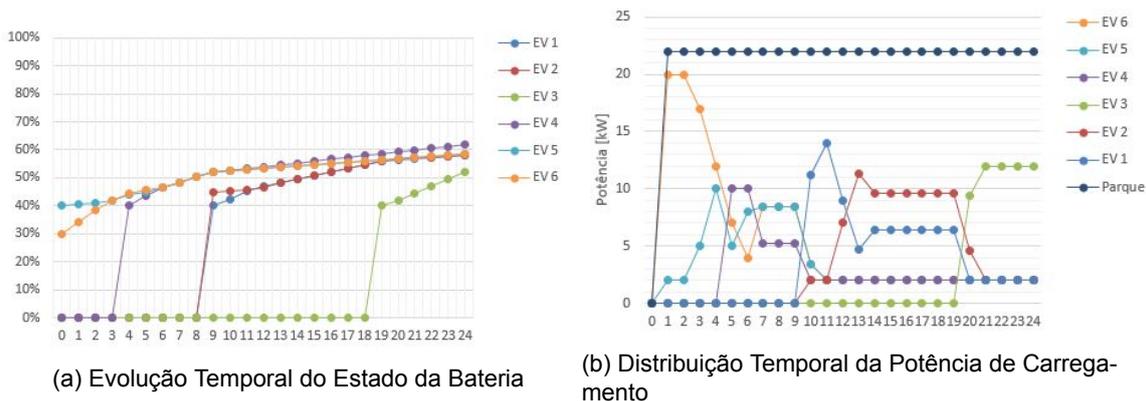


Figura 14: Gráficos da Hipótese 1 - 6 Lugares e 24 Períodos

Da análise da figura anterior, verifica-se que os EVs apresentam valores finais de bateria bastantes idênticos independentemente do período de entrada e da duração do estacionamento. Em especial, apesar de no início da simulação o EV 6 ter menos 10% de bateria quando comparado com o EV 5, no final da simulação ambos vão ter 58,44% da bateria carregada. Observa-se a influência da penalização para o EV com menor valor de bateria, uma vez que enquanto esta penalização atua, o EV penalizado apresenta um carregamento mais rápido que os restantes EVs. Na figura 14b, é possível observar que o carregador funciona à potência nominal durante toda a simulação. Uma vez que existe apenas um carregador centralizado, isto permite que no início da simulação enquanto apenas 2 EVs carregam seja injectada potência no valor de 20kW apenas num veículo, acelerando o seu carregamento. O método proposto tem tendência para reagir à entrada de novos EVs através da estabilização da distribuição das potências de carregamento.

No final dos 24 períodos, os EVs apresentam o seguinte estado de bateria:

Tabela 9: Estado de Bateria Final - Hip.1 - 6 Lugares e 24 Períodos

EV	SOCf [%]	Δ SOC [%]
1	58,19	18,19
2	57,85	12,85
3	51,96	11,96
4	61,01	21,01
5	58,44	18,44
6	58,44	28,44
Valor Médio [%]	57,65	

O valor médio final das baterias dos EVs é 57,65% enquanto que o valor médio inicial das baterias é 39,17% revelando uma diferença de 18,5%. Apenas 10% separam o EV com a bateria mais carregada do EV com menor percentagem de bateria sendo que a maioria dos EVs apresentam baterias na ordem dos 60%. Para o carregamento dos EVs, foram usados 44 kWh divididos pelos.

Se aplicarmos o segundo cenário à Hipótese 2, obtém-se a seguinte evolução temporal do estado da bateria dos EVs (Figura 15a).

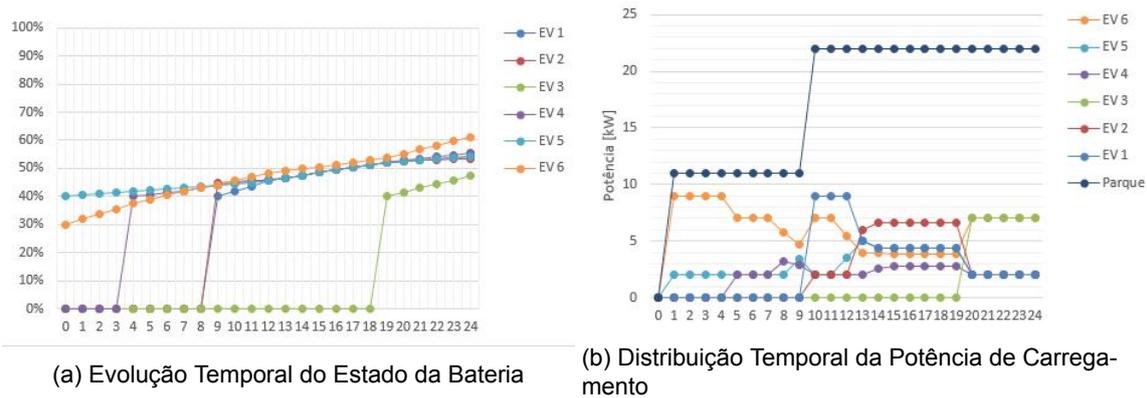


Figura 15: Gráficos da Hipótese 2 - 6 Lugares e 24 Períodos

Nesta simulação, os valores finais das baterias são inferiores uma vez que um dos carregadores não está em funcionamento até ao período 10. Isto leva a que a potência máxima distribuída durante os primeiros instantes seja 11kW em vez dos 22kW permitidos pelo conjunto dos carregadores. Esta observação é confirmada na Figura 15b em se pode observar que o parque apenas injecta 50% da potência disponível para carregamento.

No final dos 24 períodos, os EVs apresentam o seguinte estado de bateria:

Tabela 10: Estado de Bateria Final - Hip.2 - 6 Lugares e 24 Períodos

EV	SOCf [%]	Δ SOC [%]
1	54,25	18,19
2	53,56	12,85
3	47,29	11,96
4	55,5	21,01
5	54,25	18,44
6	61,06	28,44
Valor Médio [%]	54,32	

A diferença entre o valor médio final das baterias, 54,32%, e o valor médio inicial das baterias, 39,17%, é de 15,15%. Isto deve-se ao facto de apenas ter sido distribuídos 35,75kWh dos 44kWh disponíveis, ou seja, 81,25% da energia disponível.

Aplicando este cenário à Hipótese 3, obtém-se a seguinte evolução temporal do estado da bateria dos EVs (Figura 16a). Para esta hipótese, ocorre uma situação semelhante à Hipótese 2 uma vez que a potência de carregamento dos EVs apresenta 3 patamares como se pode observar na Figura 16b. Esta situação deve-se ao facto de os carregadores elétricos estarem inactivos uma vez que não têm nenhum EV ligado. Assim, durante os primeiros 4 períodos, o patamar de energia distribuída é 7,3kW, nos 5 períodos seguintes o patamar sobe para os 14,6kW até atingir os 22kW no décimo período da simulação. Observa-se que o EV 4 se destaca como o veículo mais carregado no final da simulação atingindo o patamar dos 80%.

No final dos 24 períodos, os EVs apresentam o seguinte estado de bateria:

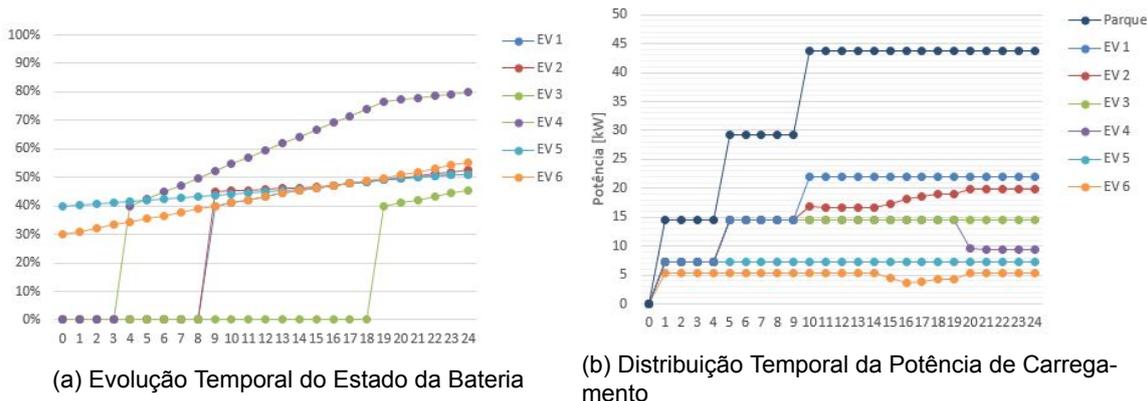


Figura 16: Gráficos da Hipótese 3 - 6 Lugares e 24 Períodos

Tabela 11: Estado de Bateria Final - Hip.3 - 6 Lugares e 24 Períodos

EV	SOCf [%]	Δ SOC [%]
1	51,17	11,17
2	52,76	7,76
3	45,46	5,46
4	79,93	39,93
5	51,17	11,17
6	55,33	25,33
Valor Médio [%]	56	

O valor médio final das baterias dos EVs é 56% sendo 17% superior ao valor médio inicial. Nesta hipótese, a energia injetada nos EVs foi aproximadamente 36,02kWh.

Por fim, aplicando este cenário à Hipótese 4, obtém-se a seguinte evolução temporal do estado da bateria dos EVs (Figura 17a). O comportamento do carregamento dos EVs para este hipótese é bastante linear uma vez

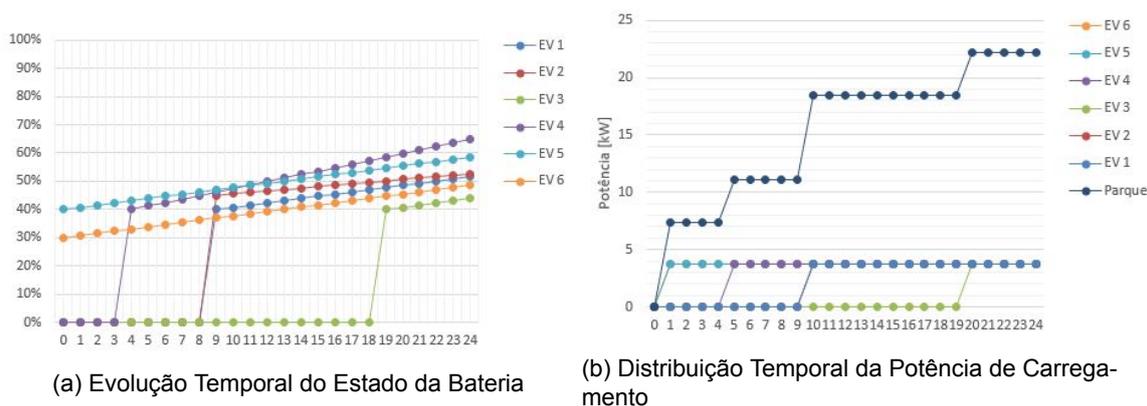


Figura 17: Gráficos da Hipótese 4 - 6 Lugares e 24 Períodos

que os carregadores vão funcionar como uma variável binária sem problema de otimização. Irão existir apenas 4 patamares de potência de acordo com a entrada dos EVs no parque de estacionamento que serão múltiplos da potência de um carregador, 3,7kW.

No final dos 24 períodos, os EVs apresentam o seguinte estado de bateria:

Tabela 12: Estado de Bateria Final - Hip.4 - 6 Lugares e 24 Períodos

EV	SOCf [%]	Δ SOC [%]
1	51,56	11,6
2	52,71	7,71
3	43,85	3,85
4	64,67	24,67
5	58,5	18,5
6	48,5	18,5
Valor Médio [%]	53,3	

Os valores finais das baterias dos EV apresentam uma média de 53,3%, 14% superior em relação ao valor inicial. A diferença entre os veículos com maior, EV 4, e o menor, EV 3, valores de bateria é cerca de 21%. Ao longo dos 24 períodos, foi entregue um total de 30,13kWh pelos 6 carregadores.

Uma análise do comportamento da função objetivo revela que o desempenho das duas primeiras hipóteses é bastante similar enquanto que as hipóteses 3 e 4 se afastam obtendo sempre valores desfasados em relação aos primeiros. A complexidade do sistema aumenta substancialmente cada vez que o um EV se liga a um carregador.



Figura 18: Progressão da Função Objetivo - 6 EVs - 24 Períodos

A análise da progressão da variável 'minSOC' revela que a primeira hipótese apresenta sempre o melhor desempenho nesta variável pois apresenta o valor mais alto. Quando maior for o intervalo de períodos sem alterações de EVs, maior será a diferença do valor 'minSOC' da hipótese 1 em relação as restantes hipóteses.

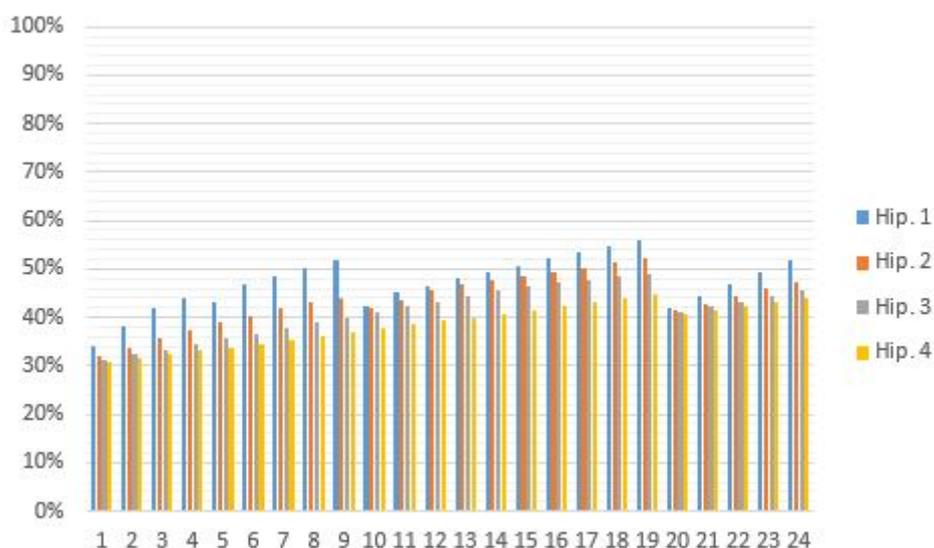


Figura 19: Valores da variável minSOC por Período - 6 EVs - 24 Períodos

O mesmo cenário foi testado considerando 48 períodos de análise. A particularidade desta situação em relação às anteriores é a saída de EVs que estiveram a ser carregados e a entrada de novos veículos para os lugares vazios do parque de estacionamento. Com isto pretende-se ver a influência das entradas e saídas dos EVs no desempenho global do parque de estacionamento.

Tabela 13: Caracterização dos EVs para um Parque de Estacionamento de 6 Lugares - 48 Períodos

EV	Max. Cap [KWh]	Entrada	Saída	Duração do Estacionamento	SOCi [%]
1	40	1	10	10	40
2	60	1	5	5	45
3	40	1	48	48	40
4	25	1	48	48	40
5	40	1	48	48	40
6	40	1	48	48	30
7	40	20	48	29	5
8	60	25	48	29	50

Como se pode ver na Tabela 13, os veículos 1 e 2 irão sair no período 10 e 5, respetivamente enquanto no período 20 o EV 7 irá ocupar o antigo lugar do EV 1 e o EV 8 irá ocupar o lugar do EV 2. Deste modo, é avaliado o desempenho do parque de estacionamento para o carregamento dos 8 EVs independentemente dos lugares existentes.

Aplicando este cenário à Hipótese 1, obtém-se o seguinte evolução temporal da bateria dos EVs (Figura 20a). Nesta figura, pode-se observar que quando o valor da bateria estabiliza, significa que o veículo elétrico saiu do parque de estacionamento como é o caso dos EVs 1 e 2. É possível observar que os EVs que finalizaram a simulação têm a bateria totalmente carregada sendo que o EV 7 faz um carregamento quase completo em 29 períodos.

Em relação à distribuição da potência de carregamento (Figura 20b), as entradas e saídas de veículos obrigam a uma nova distribuição da energia de carregamento como se pode observar nos períodos 5, 10, 20 e 25. Entre os períodos 10 e 20, 5 e 25 os lugares 1 e 2 estarão vazios pelo que a potência de carregamento será nula para estes intervalos. O mesmo acontece para o lugar 3 a partir do período 35 uma vez que o EV 3 já estará totalmente carregado.

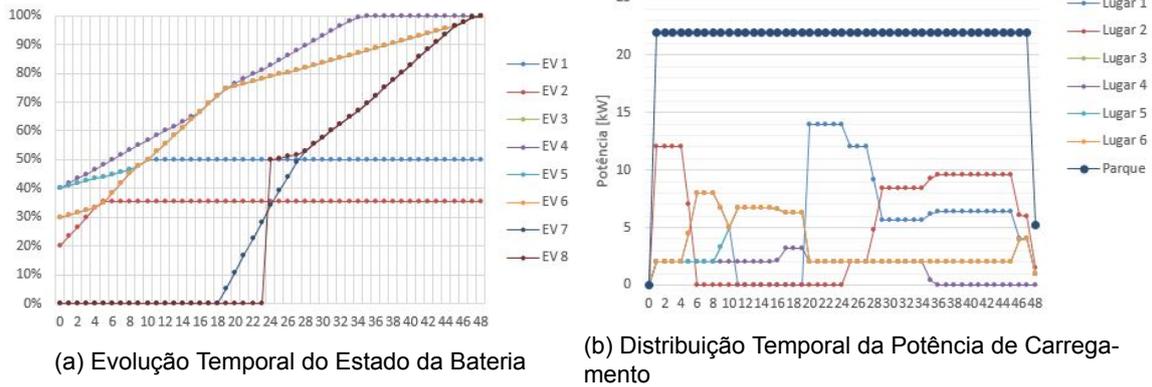


Figura 20: Gráficos da Hipótese 1 - 6 Lugares e 48 Períodos

No final dos 48 períodos, os EVs estacionados no parque de estacionamento têm a bateria totalmente carregada enquanto que, para o EV 1 e o EV 2 os valores apresentados são para o momento da sua saída. Na tabela 14 podem-se observar os valores finais da bateria dos EVs.

Tabela 14: Estado de Bateria Final - Hip.1 - 6 Lugares e 48 Períodos

EV	SOCf [%]	Δ SOC [%]
1	50,1	20,1
2	35,28	15,28
3	100	60
4	100	60
5	100	60
6	100	70
7	100	95
8	100	50
Valor Médio [%]	100	

Os valores finais das baterias dos EVs estacionados apresentam uma média de 100%, 67% superior em relação ao valor inicial que representam os primeiros 6 EVs. O total de energia injetada ao longo dos 48 períodos é de 88kWh.

Para a segunda hipótese, a Figura 21a mostra o desenvolvimento temporal da bateria dos EVs.

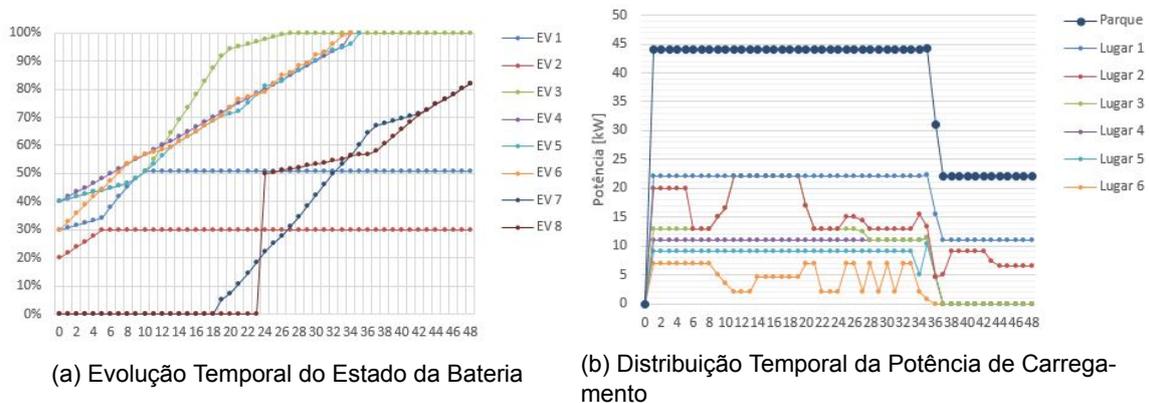


Figura 21: Gráficos da Hipótese 2 - 6 Lugares e 48 Períodos

Tal como na primeira hipótese, os EVs 3,4,5,6 são carregados totalmente até ao final da simulação. No entanto, os EVs 7 e 8 não são totalmente carregados sendo que ficam no patamar dos 80%.

A Figura 21b representa a distribuição da potência de carregamento da segunda hipótese para os 48 períodos. Da análise desta figura é perceptível que o segundo carregador de 11kW não carrega nenhum EV a partir do período 37, pelo que se cria um patamar máximo do carregador ativo.

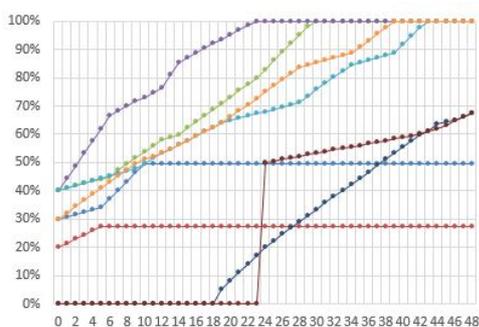
No final dos 48 períodos, o estado da bateria dos EVs é a seguinte:

Tabela 15: Estado de Bateria Final - Hip.2 - 6 Lugares e 48 Períodos

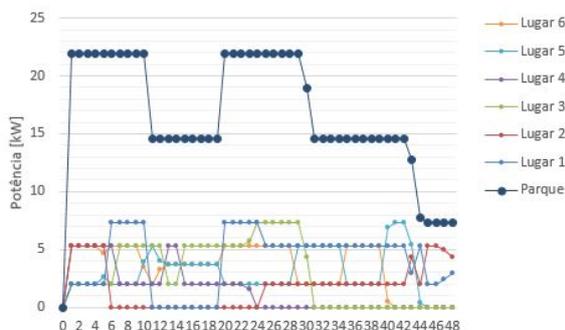
EV	SOCf [%]	Δ SOC [%]
1	50,63	20,63
2	29,72	9,72
3	100	60
4	100	60
5	100	60
6	100	70
7	81,97	76,97
8	81,97	31,97
Valor Médio [%]	94	

O valor médio das baterias dos EVs estacionados no final da simulação é 94%, 61% superior ao valor inicial das baterias do EVs estacionados no período 1. O parque de estacionamento apresenta uma injeção de energia no valor de 77,44kWh que representam cerca de 88% dos 88kWh necessários para o carregamento total dos EVs estacionados.

A Hipótese 3 produz a seguinte evolução temporal do estado das baterias quando aplicado o cenário descrito em cima (Figura 22a). Como se pode observar na figura em cima, quatro dos veículos elétricos atingem o estado



(a) Evolução Temporal do Estado da Bateria



(b) Distribuição Temporal da Potência de Carregamento

Figura 22: Gráficos da Hipótese 3 - 6 Lugares e 48 Períodos

de bateria completa enquanto os restantes veículos apenas ficam parcialmente carregados. Os últimos quatro são os EVs que apenas são carregados durante parte da simulação devido à entrada ou saída do parque de estacionamento.

Na figura 22b, observa-se a distribuição da potência de carregamento por período. Nesta situação, é possível observar que existem 3 patamares associados aos 3 carregadores de 7,3kW uma vez que durante a simulação cada carregador estará inativo. O carregador responsável por carregar os dois primeiros lugares está inativo quando os EVs 1 e 2 saíram do parque, nos períodos 10 a 20. O segundo carregador apenas está inativo a partir do período 31 enquanto o terceiro carregador carrega até ao período 44, ambos porque os EVs estão totalmente carregados.

No final dos 48 períodos, o estado da bateria dos EVs é a seguinte:

Tabela 16: Estado de Bateria Final - Hip.3 - 6 Lugares e 48 Períodos

EV	SOCf [%]	Δ SOC [%]
1	49,38	19,38
2	27,36	7,36
3	100	60
4	100	60
5	100	60
6	100	70
7	67,28	76,97
8	67,28	31,97
Valor Médio [%]	89	

Os três carregadores injetaram um total de 814kW nos EVs obtendo-se um valor médio final das baterias de 89%, 56% superior ao valor inicial. Para que os restantes EVs ficassem totalmente carregados seriam precisos distribuir 22kWh pelos dois EVs estacionados.

As Figuras 23a e 23b traduzem a evolução temporal do estado das baterias e a distribuição da potência de carregamento para a Hipótese 4 quando aplicado o cenário descrito em cima.

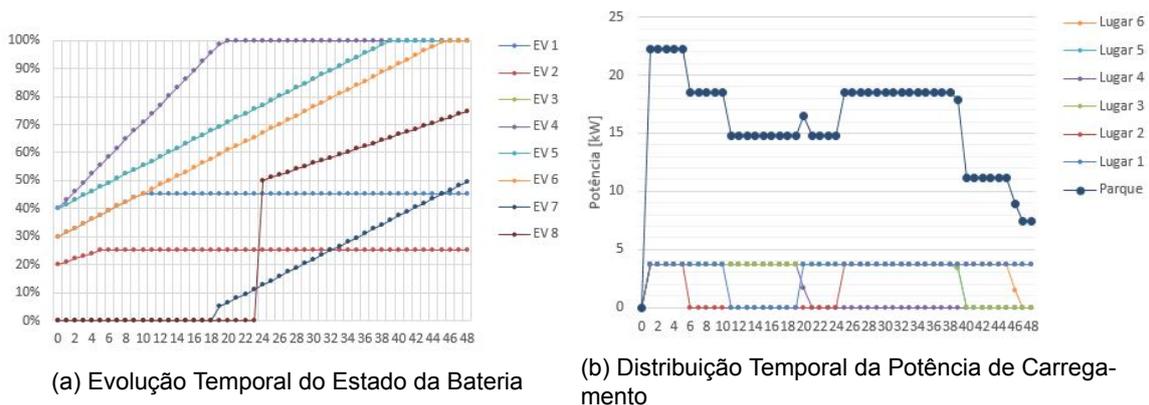


Figura 23: Gráficos da Hipótese 4 - 6 Lugares e 48 Períodos

Nesta hipótese apenas existem carregadores individuais pelo que se comportaram como variáveis binárias. Pode-se observar que enquanto os EVs carregam, não existe uma otimização da potência entregue devido a limitações técnicas. Assim, apenas os EVs 3,4,5 e 6 finalizaram a simulação com a bateria totalmente carregada.

A simplicidade da arquitetura do parque de estacionamento observa-se pela observação da injeção de potência nos EVs. Os carregadores irão estar ativos só se um EV com uma bateria parcialmente carregada estiver ligado a esse carregado, caso contrário irão estar desligados.

No final dos 48 períodos, o estado da bateria dos EVs é a seguinte:

Tabela 17: Estado de Bateria Final - Hip.4 - 6 Lugares e 48 Períodos

EV	SOCf [%]	Δ SOC [%]
1	45,88	15,88
2	25,14	5,14
3	100	60
4	100	60
5	100	60
6	100	70
7	49,71	44,71
8	74,67	24,67
Valor Médio [%]	87,4	

O valor médio final dos EVs estacionados é 87,4% pelo que foram injetados 66kWh dos 88kWh necessários para o carregamento total dos EVs. Ainda assim, o crescimento médio da potência foi aproximadamente 54%.

Uma análise do comportamento da função objetivo revela que a saída de EVs do parque aproxima o desempenho entre as várias hipóteses estudadas ao contrário da entrada que afasta a curva de cada hipótese. Durante a maioria dos períodos, o desempenho das duas primeiras hipóteses é bastante similar. No entanto, à medida que os EVs ficam totalmente carregados, a Hipótese 1 é mais capaz de otimizar a distribuição de potência ficando destacada. Em especial, a função objetivo atinge valores negativos no último período que serão estudados de seguida.

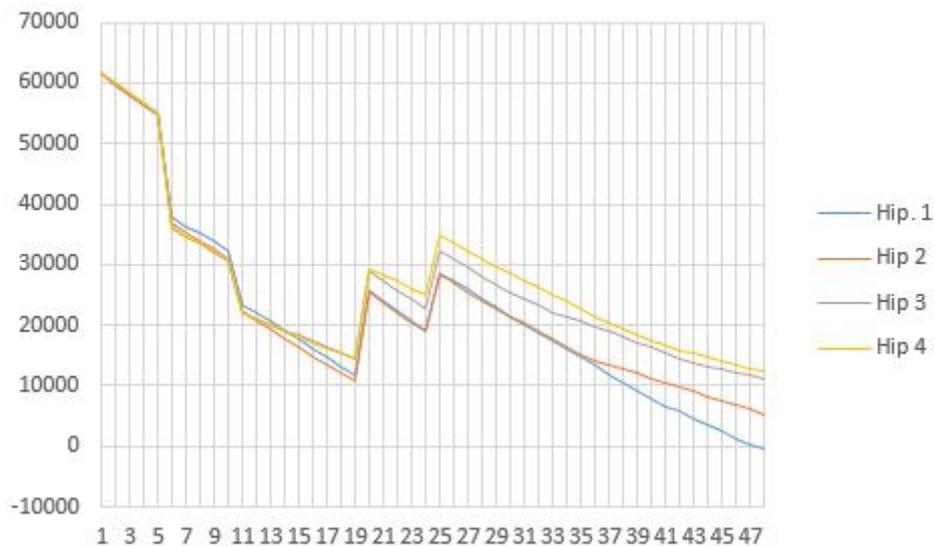


Figura 24: Progressão da Função Objetivo - 6 EVs - 48 Períodos

Ainda que exista proximidade entre hipóteses no critério da função objetivo, a variável 'minSOC' representada na Figura 25 mostra que existe uma grande diferença entre hipóteses no carregamento do EV com menor percentagem de bateria.

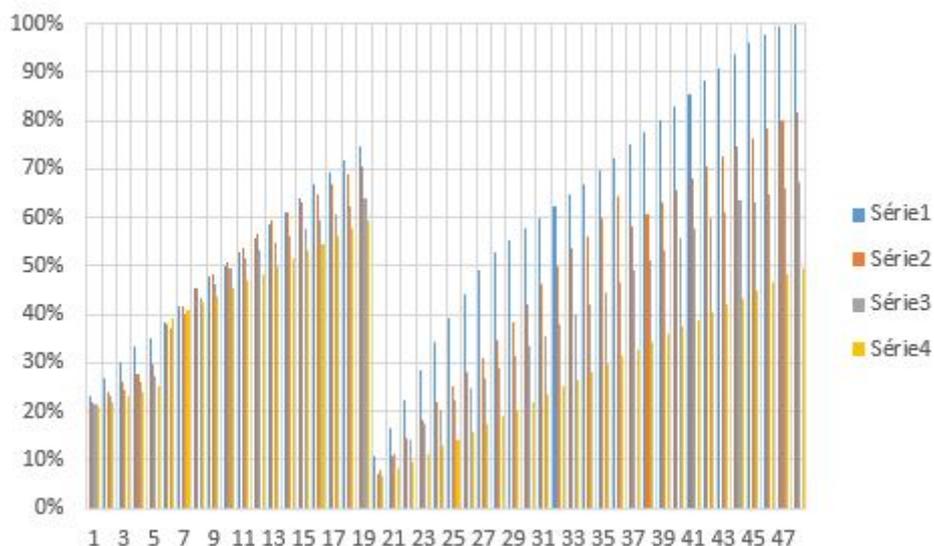


Figura 25: Valores da variável minSOC por Período - 6 EVs - 48 Períodos

4.2.2 Conclusões - CE1

Nesta secção iremos analisar os resultados para o primeiro Caso de Estudo. Neste caso de estudo pretende-se em primeiro lugar avaliar o desempenho de diferentes tipos de carregadores e, também, analisar as consequências da entrada e saída de EVs dos parque de estacionamento.

Começando por analisar o critério do estado da bateria no parque de estacionamento com 5 lugares observa-se que a Hipótese 2 (arquitetura com 2 carregadores) apresenta a valor médio final mais alto das baterias, 66%. No entanto, uma comparação com os valores das baterias da Hipótese 1 (que apresenta um valor médio apenas 2% inferior à Hip. 2) revela que o carregamento é mais equilibrado para esta hipótese. Esta conclusão retira-se da Tabela 18 que apresenta na coluna Intervalo a diferença entre o maior valor de bateria e o menor valor de bateria para cada hipótese. As hipóteses 3 e 4 apresentam valores inferiores às duas primeiras arquiteturas pelo que se pode concluir que apresentam um desempenho mais fraco.

Tabela 18: Valores Finais de Bateria de cada EV em percentagem - 5 Lugares

Hipótese	EV 1	EV 2	EV 3	EV 4	EV 5	Valor Médio	Intervalo
1	65,42	64,94	54,26	70	65,42	64	15,4
2	63,13	58,92	48,71	85,33	74,63	66	36,62
3	62	58,86	46,71	61,39	73,31	60	26,6
4	62	54,17	44,58	76,67	62	60	32,09

De acordo com os gráficos da potência entregue por cada carregador observa-se que tanto a primeira hipótese como a segunda fazem um uso total da potência disponível, isto é possível porque ambas as hipóteses apresentam arquiteturas com carregadores centralizados que permitem maior flexibilidade na distribuição de potência. No caso das restantes hipóteses, as limitações técnicas associadas aos carregadores com características mais individuais implicam que durante a simulação ocorram vários períodos em que um ou mais carregadores não estejam a carregar nenhum EV.

A análise dos valores da função objetivo ao longo da simulação revela que as entradas de EVs no parque de estacionamento implicam um aumento do valor da função objetivo, em função do SoC inicial da bateria do EV. Adicionalmente, observa-se que tanto a hipótese 3 e 4 apresentam valores mais altos, ou seja, piores desempenhos. Ao longo dos períodos, as primeiras hipóteses obtêm continuamente valores muito idênticos ainda que existam

diferenças significativas no carregamento dos EVs. O gráfico da evolução temporal da função objetivo pode-se observar na Figura 12.

Por fim, a variável 'minSOC' (Figura 13) demonstra que a Hipótese 1 apresenta os valores mais altos quando comparado com as outras hipóteses, destaca-se também que a diferença para as restantes hipóteses será tanto maior quanto maior for o intervalo de períodos sem alterações no parque de estacionamento, isto é, entradas e saídas de veículos.

Para o cenário em que o parque de estacionamento tem 6 lugares e ocorre o carregamento de 6 EVs, observou-se que à medida que a complexidade do cenário aumenta, o desempenho será tanto melhor quanto mais centralizado for a arquitetura de carregamento. Em baixo, pode-se ver a Tabela 19 que mostra os dados relativos a este cenário.

Tabela 19: Valores Finais de Bateria de cada EV em percentagem - 6 Lugares - 24 Períodos

Hipótese	EV 1	EV 2	EV 3	EV 4	EV 5	EV 6	Valor Médio	Intervalo
1	58,19	57,85	51,96	61,01	58,44	58,44	57,65	9,05
2	54,25	53,56	47,29	55,5	54,25	61,06	54,32	13,77
3	51,17	52,76	45,46	79,93	51,17	55,33	56	34,47
4	51,56	52,71	43,85	64,67	58,5	48,5	53,3	20,82

Como se pode observar, a Hipótese 1 apresenta o melhor carregamento para todos os EVs uma vez que a presença de apenas um carregador permite uma maior redistribuição da potência. Consequentemente, o valor médio é maior para a primeira hipótese. Adicionalmente, o serviço de carregamento desta hipótese revela ser bastante equilibrado uma vez que o Intervalo é menor do que 10% e todos os EVs apresentam baterias superiores a 50%. As restantes hipóteses apresentam desempenhos bastante semelhantes ainda que quantitativamente inferiores à primeira hipótese.

Em relação à potência usada no carregamento e a distribuição da mesma, observa-se que apenas a Hipótese 1 usa a potência total durante toda a simulação. As restantes hipóteses apenas usam parte desta potência. No caso da Hipótese 2, até ao período 10 apenas se usam 11kW, 50% da potência total disponível. A terceira hipótese tem o primeiro patamar de 7,3kW até ao período 5, o segundo patamar de 14,6kW até ao décimo período no qual atinge os 22kW. A última hipótese mostra que os carregadores individuais apenas estão ativos quando um EV se liga ao carregador.

Em relação à função objetivo, a primeira hipótese encontra-se claramente destacada nos períodos iniciais devido à possibilidade de usar toda a potência enquanto que, no final da simulação, esta diferença é minimizada. As restantes hipóteses apresentam valores muito próximos que vão de encontro às semelhanças encontradas na análise do estado final das baterias dos EVs.

De igual modo, a variável 'minSOC' está de acordo com as observações feitas anteriormente mostrando que a hipótese 1 tem o melhor desempenho.

Em relação ao primeiro caso de estudo, resta ainda analisar os resultados obtidos em relação ao parque de estacionamento com 6 lugares e 8 EVs durante 48 períodos. Para esta situação, procurou-se entender o impacto da entrada e saída de EVs do parque de estacionamento. As arquiteturas de carregamento estudadas são as mesmas que na situação anterior pelo que o estado das baterias dos EVs pode ser observado na seguinte tabela:

Tabela 20: Valores Finais de Bateria de cada EV em percentagem - 6 Lugares - 48 Períodos

Hipótese	EV 1	EV 2	EV 3	EV 4	EV 5	EV 6	EV 7	EV 8
1	50,1	35,28	100	100	100	100	100	100
2	50,63	29,72	100	100	100	100	81,97	81,97
3	49,38	27,36	100	100	100	100	67,28	67,28
4	45,88	25,14	100	100	100	100	49,71	74,67

Hipótese	Valor Médio	Intervalo
1	100	0
2	94	18,03
3	89	32,72
4	87,4	50,29

Como se pode observar, a hipótese 1 finaliza a simulação com os EVs, estacionados no parque, totalmente carregados pelo que o valor médio é 100% enquanto que a diferença entre o maior valor e o menor valor de bateria dos EVs estacionados é 0. A Hipótese 2 apresenta o carregamento completo para os veículos que estiveram estacionados durante toda a simulação enquanto que os EVs 7 e 8 apresentam baterias próximas de carregamento completo. Adicionalmente, os EVs 7 e 8 apresentam valores de bateria para os quais já se pode fazer o uso normal. A situação das restantes hipóteses é semelhante mas, devido às limitações técnicas da arquitetura de carregamento, os valores dos EVs 1,2, 7 e 8 serão tanto inferiores quanto mais individual forem os carregadores.

Em relação à distribuição de energia, a maior liberdade da hipótese com carregador centralizado atribui o melhor desempenho tanto no estado da bateria dos EVs como na utilização da potência total do parque de estacionamento. Ao contrário das restantes hipóteses, a hipótese 1 é a única que durante a simulação distribui os 22kW pelos 6 lugares.

Observando a progressão da função objetivo para esta situação (Figura 24) entende-se que a saída de veículos aproxima o desempenho das várias hipóteses uma vez que quebra a otimização contínua de cada hipótese. Por sua vez, a entrada de novos EVs parece facilitar a diferenciação do desempenho de cada hipótese. Em especial, observa-se que quando todos os EVs estacionados no parque atingem o nível de bateria totalmente carregado, a função objetivo apresenta valores negativos. Neste caso, o valor final da função objetivo da primeira hipótese foi -395. Este valor traduz-se pela influência de parâmetros diretos na função objetivo, isto é, a penalização que pretende dar prioridade aos veículos com menor valor de bateria é subtraída diretamente durante o cálculo da função objetivo de cada período. Por sua vez, esta subtração avalia a função objetivo em valores negativos quando todos os EVs do parque de estacionamento estão totalmente carregados e não há trânsito de energia para os EVs.

Assim, as arquiteturas com carregadores centralizados apresentam melhores desempenhos devido a um maior grau de liberdade na distribuição da energia proveniente da rede. Esta distribuição vai influenciar o estado de bateria dos EVs permitindo dar prioridade a certos EVs e obter potências mais altas no carregamento individual, ou seja, carregamentos mais rápidos. Conclui-se, em primeiro lugar, que a otimização do carregamento por parte do modelo proposto depende da arquitetura de carregamento instalada na medida em que a distribuição de potência está diretamente limitada pelas capacidades dos carregadores. Em especial, observa-se que a metodologia em prática procura maximizar a entrega de energia sempre que possível. Em segundo lugar, entende-se que o estudo de parques com carregadores individuais não têm relevância para este trabalho dado que o seu comportamento binário não pode ser alvo de otimização por parte do modelo proposto. Adicionalmente, observa-se que o algoritmo proposto é bastante capaz de otimizar o carregamento aproveitando ao máximo a potencialidade de cada arquitetura de carregamento estudada.

4.3 Caso de Estudo 2

Neste caso de estudo irá-se aplicar a metodologia proposta com a intenção de entender o impacto da existência de veículos VIP no carregamento dos EVs e na distribuição da potência entregue pelos carregadores consoante os critérios estabelecidos na Tabela 2.

Neste caso de estudo vai-se estudar um parque de estacionamento com 10 lugares e 10 EVs em que 2 destes veículos são considerados VIP e, para qualquer simulação neste caso de estudo, os parâmetros de simulação são os seguintes: potência mínima de carregamento de um EV é 2kW sendo que a variação máxima da potência de carregamento é 5kW. O limite definido para o nível 1 é 40% da bateria do EV, o limite superior do nível 2 é 85% sendo que o nível 3 terá como limite 100%. De forma semelhante ao primeiro caso de estudo, foram consideradas quatro hipóteses para o carregamento dos EVs:

- Hipótese 1 - 1 Carregador - 44kW - responsável por carregar os 10 lugares;
- Hipótese 2 - 2 Carregadores - 22kW - cada carregador é responsável por carregar 5 lugares;
- Hipótese 3 - 4 Carregadores - 13,2kW e 8,8kW - cada carregador de 13,2kW é responsável por carregar 3 lugares enquanto que os dois carregadores de 8,8kW carregam 2 lugares cada;
- Hipótese 4 - 5 Carregadores - 8,8kW - cada carregador tem a responsabilidade de carregar dois lugares

4.3.1 Análise Estatística - CE2

As hipóteses anteriores são testadas para parques de estacionamento com VIPs e sem VIPs de modo a que existam termos de comparação de desempenho. Os veículos VIPs que serão estudados vão ser designados como VIP 1 e VIP 2. O VIP 1 é um EV cuja capacidade da bateria é 40kWh, o estado inicial da bateria vai ser de 30% e o carregamento do veículo só começa no período 10 quando este se liga ao carregador. O VIP 2 é EV que vai carregar durante toda a simulação, ou seja, durante os 24 períodos e apresenta 35% da bateria que apresenta uma capacidade de 35kWh. Os restantes EVs apresentam baterias com capacidade entre os 30kWh e os 50kWh e níveis de bateria entre os 30% e os 50%. Estes dados podem ser observados na seguinte Tabela 21.

Tabela 21: Caracterização dos EVs para um Parque de Estacionamento de 10 Lugares

EV	Max. Cap [KWh]	Entrada	Saída	Duração do Estacionamento	SOCi [%]
EV 1 / VIP 1	40	10	24	15	30
2	60	10	24	15	35
3	40	20	24	5	40
4	45	5	24	20	45
5	50	1	24	24	50
EV 2 / VIP 2	35	1	24	24	35
7	30	1	24	24	30
8	40	1	24	24	40
9	45	1	24	24	45
10	50	1	24	24	50

Aplicando os cenários com VIPs e sem VIPs à hipótese 1, obteve-se as seguinte figuras que mostram a evolução do estado da bateria e a distribuição da potência de carregamento:

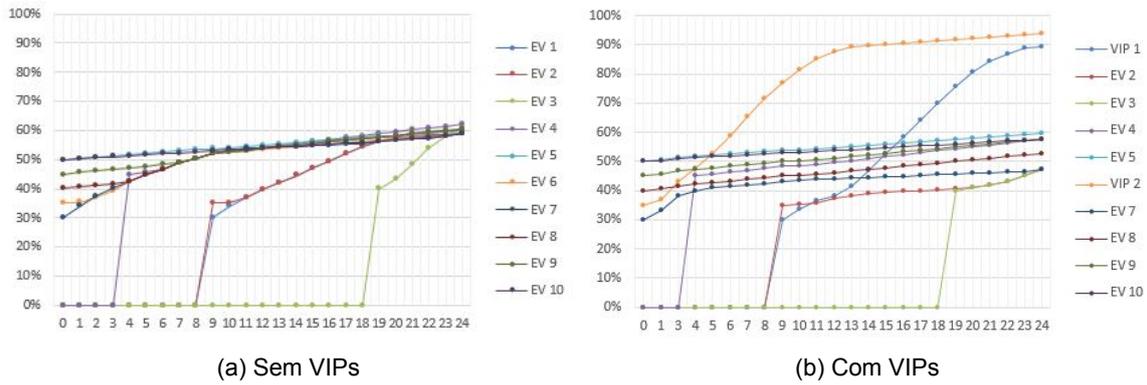


Figura 26: Evolução Temporal do Estado das Baterias da Hipótese 1 - 10 Lugares

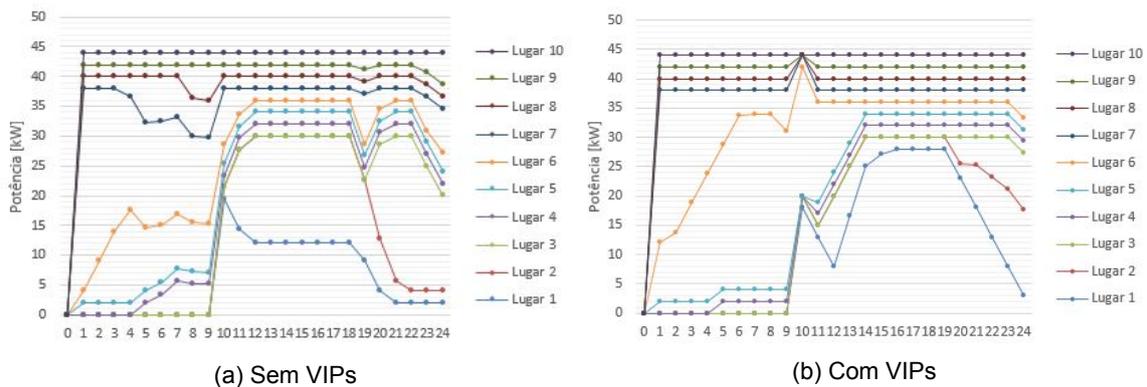


Figura 27: Distribuição Temporal da Potência de Carregamento da Hipótese 1 - 10 Lugares

Numa observação rápida dos gráficos do estado das baterias, destaca-se que os VIPs apresentam níveis de bateria bastante superiores aos restantes EVs. Esta diferença deve-se à distribuição da potência que entrega aos dois veículos VIPs um total de 47,52kWh, cerca de 54% de toda a energia entregue aos EVs. À medida que os veículos VIP atingem níveis elevados de SoC, o peso das suas penalizações diminui pelo que existe um desacelerar do carregamento como se pode verificar. Para ambos os casos, os EVs que não são considerados VIP apresentam valores bastante próximos sendo que na situação sem VIPs, o intervalo entre o maior valor e menor valor de bateria é inferior a 5%. Observa-se que a distribuição da potência tem um carácter mais dinâmico em parques de estacionamento sem a presença de VIPs. No período 10, a restrição que garante que qualquer EV é carregado com a potência mínima de 2kW não é cumprida. Uma análise mais profunda revela que ao estacionar, o VIP 2 tem um valor de SoC bastante baixo. Como a penalização dos veículos premium se soma à penalização de cada nível de bateria, este EV atinge um valor de penalização superior à penalização que garante o carregamento da potência mínima para os restantes veículos. Assim, o modelo pretere esta última restrição.

Na Tabela 22 estão apresentados os valores finais das baterias dos EVs. Adicionalmente, faz-se um estudo para o valor médio dos restantes EVs quando existem VIPs e quando não existem VIPs para quantificar o impacto dos veículos premium.

Tabela 22: Estado de Bateria Final - Hip.1 - 10 Lugares

Evs	VIP	Sem VIPs	Média com VIPs
1	89,36	59,00	53,38
2	47,20	59,01	Média sem VIPs
3	47,20	61,51	60,20
4	57,66	62,18	Δ Média
5	59,58	60	6,82
6	93,80	58,93	Δ VIP 1
7	47,20	58,93	30,36
8	52,78	60,51	Δ VIP 2
9	57,78	60,51	34,87
10	57,67	58,93	

Analisando as diferenças entre as duas situações, observa-se que ambos os VIPs apresentam resultados com mais 30% de bateria quando comparado com os veículos regulares. Observa-se que os restantes veículos da situação em que existem VIPs apresentam baterias menos carregadas, em média 6% menos carregados, que a situação com apenas veículos regulares.

A aplicação dos cenários à Hipótese 2 produz as seguintes Figuras 28 e 29 que mostram a evolução temporal do estado das baterias e a distribuição de energia em cada período.

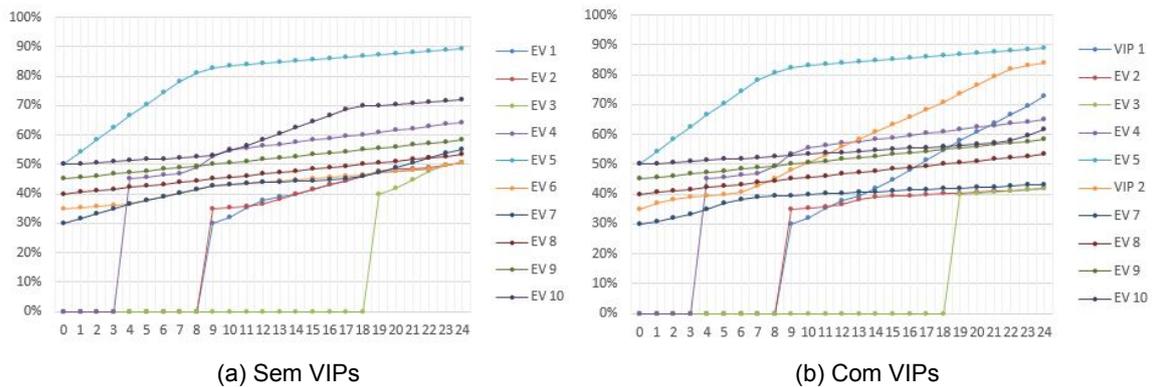


Figura 28: Evolução Temporal do Estado das Baterias da Hipótese 2 - 10 Lugares

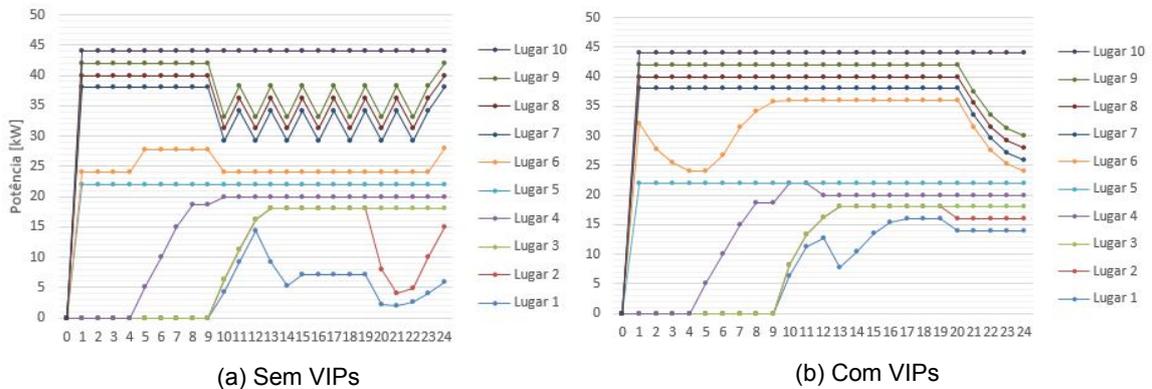


Figura 29: Distribuição Temporal da Potência de Carregamento da Hipótese 2 - 10 Lugares

Devido à arquitetura da hipótese 2, durante os primeiros períodos de ambos os cenários, um dos carregadores

de 22kW apenas faz o carregamento do EV 5 levando a que seja injetada quase a totalidade da capacidade do carregador neste EV. Assim, para ambos os casos, o EV 5 apresenta o maior nível de bateria ainda que o seu crescimento tenha sido lento durante 15 períodos. Os veículos VIPs apresentam baterias mais carregadas que os restantes EV. No entanto, a diferença em relação aos veículos regulares diminui em relação à hipótese 1.

Tal como na primeira hipótese, o carregamento de EVs em parques de estacionamento sem a presença de VIPs apresenta um carácter mais dinâmico uma vez que existe uma maior necessidade de redistribuição das potências entregues aos veículos.

No final da simulação, os EVs apresentam os seguintes valores:

Tabela 23: Estado de Bateria Final - Hip.2 - 10 Lugares

Evs	VIP	Sem VIPs	Média Com VIP
1	72,66	50,66	56,78
2	41,82	50,66	Média Sem VIP
3	42,08	50,66	61,68
4	65	64,25	Δ Média
5	88,97	89,44	4,90
6	83,93	50,66	Δ VIP 1
7	43,2	54,95	22
8	53,33	53,33	Δ VIP 2
9	58,33	58,33	33,26
10	61,54	71,81	

Para a hipótese 2, o VIP 1 e o VIP 2 apresentam 22% e 33% de bateria superior em relação a uma situação em que estes dois veículos não usam um serviço premium. A redução da vantagem do serviço VIP deve-se à arquitetura do parque que apresenta um menor grau de liberdade do que a primeira hipótese. A diferença entre a média das baterias do restantes EVs também diminui para 4,9% ainda que todos os EVs do cenário sem VIPs apresentem baterias com níveis superiores a 50%.

A partir da aplicação destes cenários à hipótese 3 podem-se retirar as Figuras 30 e 31

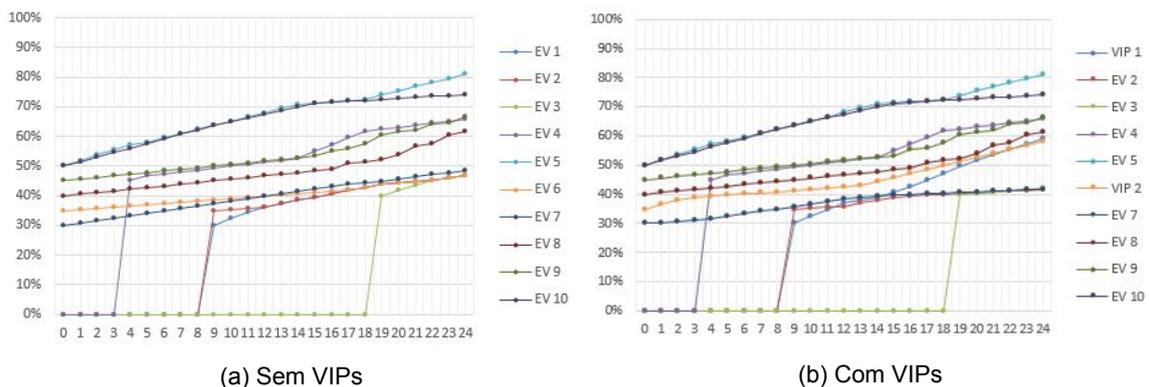


Figura 30: Evolução Temporal do Estado das Baterias da Hipótese 3 - 10 Lugares

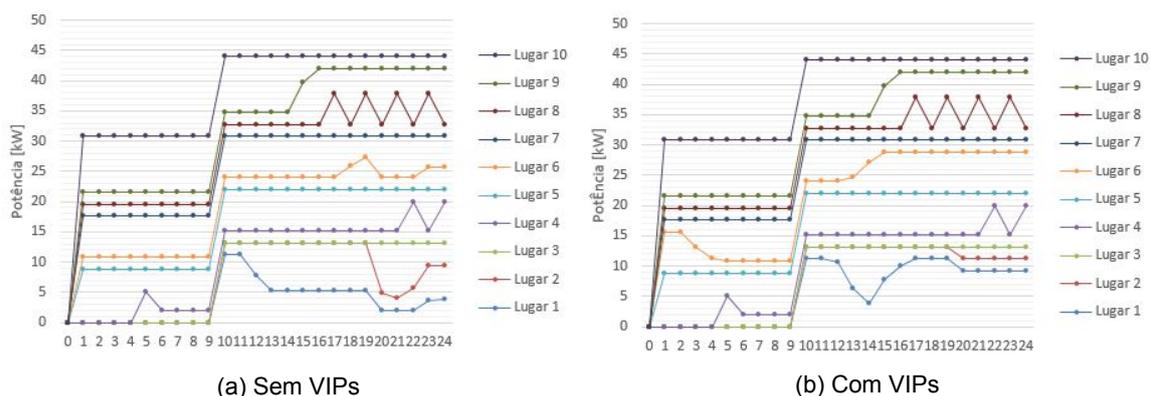


Figura 31: Distribuição Temporal da Potência de Carregamento da Hipótese 3 - 10 Lugares

Para a terceira hipótese, o facto de haver 4 carregadores no parque de estacionamento diminui o impacto do agente diferenciador para os veículos VIP uma vez que a potência disponível para o carregamento destes EVs diminui devido aos limites de potência associados aos carregadores. Deste modo, um carregador de 8,8kW (responsável por carregar os lugares 4 e 5) e um carregador de 13,2kW (responsável por carregar os lugares 8, 9 e 10) carregam sem restrições adicionais (ao contrário dos carregadores dos VIPs) os 5 veículos nos seus lugares. Isto leva a que os EVs 4, 5, 8, 9 e 10 apresentem valores iguais de bateria para ambos os cenários.

Devido à arquitetura e à entrada dos EVs no parque de estacionamento, também se observa que a potência total disponível nos carregadores não é inteiramente aproveitada dado que um carregador de 13,2 kW está inativo durante os primeiros 9 períodos da simulação.

No final da simulação, os EVs apresentam os seguintes valores:

Tabela 24: Estado de Bateria Final - Hip.3 - 10 Lugares

Evs	VIP	Sem VIPs	Média Com VIP
1	59,26	46,79	59,3
2	41,60	46,79	Média Sem VIP
3	42,08	46,79	61,36
4	65,73	65,73	Δ Média
5	81,04	81,04	2,06
6	58,36	46,79	Δ VIP 1
7	43,79	48,41	12,48
8	61,50	61,50	Δ VIP 2
9	66,50	66,50	11,58
10	74,16	74,16	

Da análise da Tabela 24 retira-se que a diferença entre os dois cenários diminui quanto mais individuais forem os carregadores pelo que apenas se verifica uma diferença dos valores médios da baterias dos EVs regulares de 2%. Adicionalmente, a vantagem de ter um serviço premium para um parque de estacionamento com este desenho de carregadores representa num aumento de valores próximos de 10% no carregamento da bateria.

Para a hipótese 4, a aplicação deste cenários revelou as seguintes progressões temporais dos níveis das baterias e da distribuição de energia.

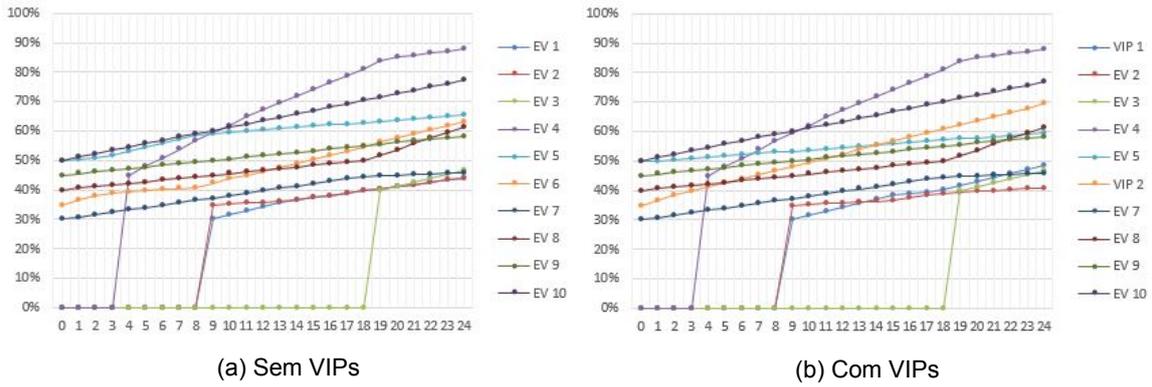


Figura 32: Evolução Temporal do Estado das Baterias da Hipótese 4 - 10 Lugares

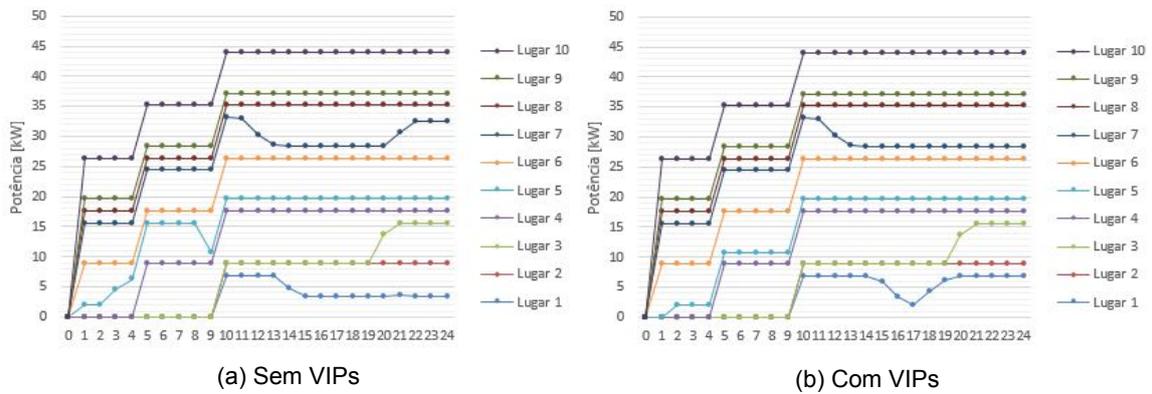


Figura 33: Distribuição Temporal da Potência de Carregamento da Hipótese 4 - 10 Lugares

Para esta hipótese que apresenta 5 carregadores de 8,8kW, as diferenças entre as situações diminuem tornando-se quase desprezáveis. Pela observação do carregamento dos EVs observa-se que as diferenças entre as situações se resumem apenas aos dois veículos VIPs e aos EVs 2 e 5. Uma vez que a complexidade do problema diminui devido à presença de carregadores mais individuais, a vantagem de usar um serviço premium também diminui uma vez que estes carregadores apenas permitem a distribuição de pequenas potências de carregamento. Adicionalmente, observa-se a existência de 3 patamares correspondentes a momentos em que um ou mais carregadores se encontram inativos.

No final da simulação, os EVs apresentam os seguintes estados de bateria:

Tabela 25: Estado de Bateria Final - Hip.4 - 10 Lugares

Evs	VIP	Sem VIPs	Média Com VIP
1	48,68	44	59,7
2	40,88	44	Média Sem VIP
3	46,71	46,71	60,86
4	87,88	87,88	Δ Média
5	59,58	65,40	1,16
6	69,42	63,20	Δ VIP 1
7	45,98	46	4,68
8	61,33	61,33	Δ VIP 2
9	58,33	58,33	6,21
10	76,91	77,2	

Como se pode observar, existem bastantes valores de bateria iguais para as duas situações sendo as diferenças quase desprezáveis. Esta observação comprova-se pela diferença inferior a 2% das médias das baterias do EVs regulares no final da simulação.

A partir da análise das funções objetivo das quatro hipóteses para ambos os cenários observa-se que a adição de uma penalização para que se desenvolva um carregamento premium para um VIP implica que as funções objetivos apresentem valores mais altos como se pode observar nas Figuras. 34a e 34b. No entanto, este aumento não deve exclusivamente a esta penalização uma vez que os cenários com VIPs apresentam EVs com menores valores de bateria, isto é, que são mais penalizados para o carregamento. A função objetivo reage de igual modo para ambos os cenários dado que todas as hipóteses expostas apresentam o mesmo formato.

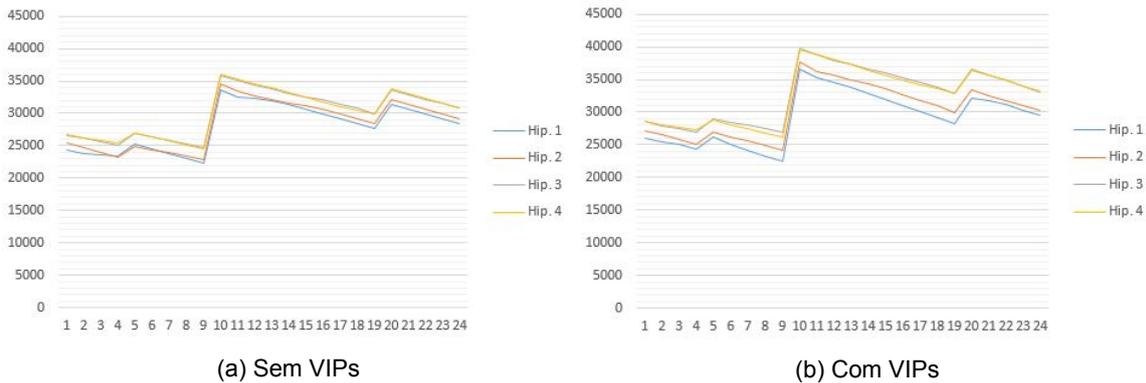


Figura 34: Progressão da Função Objetivo - 10 EVs - 24 Períodos

A análise da variável 'minSOC' mostra que num cenário com VIPs não existe crescimento relevante dos veículos com menor valores de bateria uma vez que a prioridade está direcionada para os veículos VIP devido ao peso da penalização.

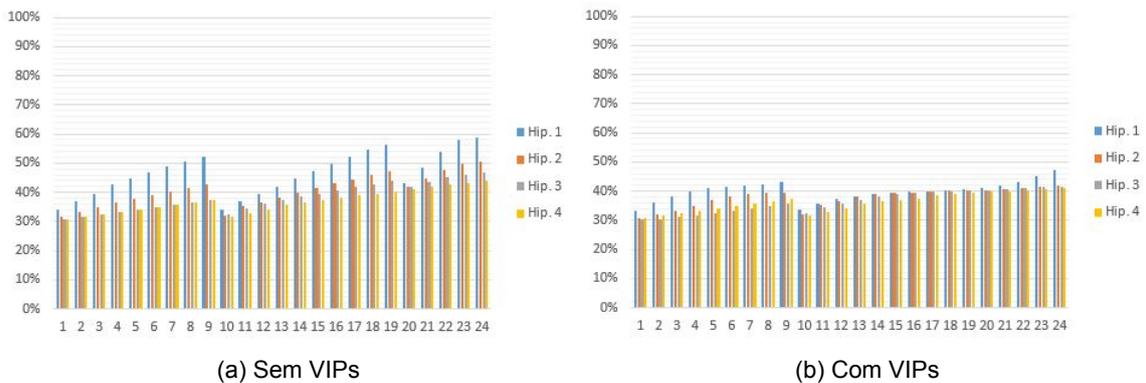


Figura 35: Valores da variável MinSOC por Período - 10 EVs - 24 Períodos

4.3.2 Conclusões - CE2

Nesta secção iremos analisar os resultados para o segundo Caso de Estudo. Neste caso de estudo pretende-se avaliar a possibilidade da existência de utilizadores 'premium' que se traduz num carregamento mais rápido desses EVs e, também, as consequências deste tipo de comportamento no carregamento dos restantes EVs. Assim, os principais critérios de avaliação serão o Estado das Baterias e a Potência Entregue.

Começando a análise do caso de estudo pelo critério do estado da bateria observa-se que a hipótese 1 (arquitetura com apenas um carregador com 44kW) apresenta um aumento significativo no carregamento dos EVs caso estes sejam VIPs. Nesta situação, os VIPs apresentam um aumento superior a 30% do nível da bateria atingindo valores próximos ou superiores a 90% da sua capacidade. O carregamento mais acelerado dos VIPs implica

que seja entregue substancialmente menos energia aos restantes EVs pelo que o valor médio final dos veículos regulares é quase 7% inferior ao caso do parque de estacionamento sem VIPs e com a mesma arquitetura de carregamento. No caso da segunda hipótese, os valores finais da bateria dos VIPs não são tão promissores visto que para o VIP 2 o aumento é também superior a 30% mas o VIP 1 tem um aumento ligeiramente superior a 20%. A hipótese 3 mostra um aumento superior a 10% da bateria dos VIPs a custo de uma diminuição de 2% do valor médio final dos restantes EVs regulares. A arquitetura menos centralizada que caracteriza a hipótese 4 mostra que neste caso os VIPs não contrastam em termos de bateria com os restantes EVs. Estes dados estão expostos na Tabela 26.

Tabela 26: Valores Finais de Bateria de cada EV em Percentagem - 10 Lugares

EV	Com VIP				Sem VIP			
	Hip. 1	Hip. 2	Hip. 3	Hip. 4	Hip. 1	Hip. 2	Hip. 3	Hip.4
1	89,36	72,66	59,26	48,68	59,00	50,66	46,79	44,00
2	47,20	41,82	41,60	40,88	59,01	50,66	46,79	44,00
3	47,20	42,08	42,08	46,71	61,51	50,66	46,79	46,71
4	57,66	65,00	65,73	87,88	62,18	64,25	65,73	87,88
5	59,58	88,97	81,04	59,58	60,00	89,44	81,04	65,40
6	93,80	83,93	58,36	69,42	58,93	50,66	46,79	63,20
7	47,20	43,20	41,79	45,98	58,93	54,95	48,41	46,00
8	52,78	53,33	61,50	61,33	60,51	53,33	61,50	61,33
9	57,78	58,33	66,50	58,33	60,51	58,33	66,50	58,33
10	57,67	61,54	74,16	76,91	58,93	71,81	74,16	77,20
Média dos Evs	53,38	56,78	59,30	59,70	60,20	61,68	61,36	60,86

	Hip. 1	Hip. 2	Hip. 3	Hip. 4
Δ Média	6,82	4,90	2,06	1,16
Δ VIP N1	30,36	21,99	12,48	4,68
Δ VIP N2	34,87	33,26	11,58	6,21

A análise da distribuição da potência das quatro hipóteses para ambos as situações mostra que o carregamento dos VIPs é bastante influenciado pela arquitetura do parque de estacionamento. A hipótese 1 apresenta apenas um carregador central, responsável por carregar os 10 lugares, com a mesma capacidade que o conjunto de carregadores de cada uma das outras hipóteses mas sem estar restringido pelas limitações técnicas desses carregadores de menor capacidade. Assim, é possível fazer uma distribuição sem restrições técnicas adicionais injectando mais energia nos VIPs.

A função objetivo apresenta um carácter muito quantitativo pelo que não adiciona conclusões a este caso de estudo. Por fim, a progressão da variável 'minSOC' para cada período mostra que a presença de veículos VIP também tem as suas desvantagens. Se por um lado a penalização permite que os VIPs tenham um carregamento mais rápido, por outro esta penalização relativiza o peso das penalizações associadas tanto aos veículos com o menor valor de bateria como também ao EVs com bateria percente ao nível 1 (inferiores a 40%).

Do ponto de vista de gestão comercial de um parque de estacionamento, aceitar subscrições para contratos 'premium' é uma opção bastante aconselhável uma vez que aumenta as receitas do mesmo parque sem aumentar a capacidade máxima associada à infraestrutura. No entanto, esta opção deve ser tomada com certas precauções uma vez que a presença de VIPs afeta o desempenho global do carregamento de EVs e é necessário que esteja garantida uma qualidade de serviço mínima para todos os utilizadores.

Assim, pode-se concluir que apenas certas arquiteturas podem ser empregadas de modo a garantir ambos os serviços, carregamento VIP e carregamento regular. Segundo os dados retirados deste caso de estudo, carregadores centralizados apresentam um melhor desempenho por permitirem uma variedade vasta de distribuição

de energia. Esta conclusão vai de encontro com o raciocínio feito no primeiro caso de estudo que mostra que os carregadores centralizados permitem um maior grau de liberdade na otimização da distribuição energética, oferecendo, portanto, um melhor desempenho. De forma igual ao primeiro caso de estudo, o modelo procura maximizar a potência aplicada aos EVs em cada período sempre que possível.

4.4 Caso de Estudo 3

No último caso de estudo, o método proposta será aplicado com a intenção de procurar uma solução para o problema 'Min(FunObj)' num parque de estacionamento com um maior grau de complexidade. O objetivo deste caso é avaliar a efetividade do modelo desenhado através do desempenho dos carregadores, da distribuição de energia e, ainda, do investimento necessário em equipamento de carregamento.

Numa fase inicial estuda-se o impacto das regras e dos valores das penalizações na otimização dos carregamentos dos EVs e na progressão da função objetivo. Depois, são desenvolvidas e simuladas várias arquiteturas de carregamento para a adopção de EVs em larga escala. De seguida, serão estudados os utilizadores premium para os cenários com melhor desempenho. Após a apresentação dos dados recolhidos para cada cenário, são feitas as conclusões.

4.4.1 Análise Estatística - CE3

No terceiro caso de estudo e para qualquer simulação, o parque de estacionamento tem 100 lugares que são ocupados por EVs que respeitem as seguintes indicações. Em primeiro lugar, os EVs vão representar as quotas de mercados de cada modelo de veículo procurando fazer um retrato mais fiável da atualidade dos veículos elétricos. Depois, cada EV respeitará um perfil de utilização diário de modo a criar uma situação de carregamento realista para cada parque. Tendo em conta que a simulação começa à meia noite e com a duração de 576 períodos de 5 minutos, os EVs encontram-se inicialmente estacionados independentemente do perfil de uso. Em baixo pode-se observar os perfis de utilização considerados:

1. 3% dos EVs não saem do parque de estacionamento durante a simulação;
2. 70% dos EVs saem entre as 6:30 e as 8:30 da manhã e regressam entre as 17:30 e as 20:30;
3. 17% dos EVs apresentam comportamento aleatório.
4. 10% dos EVs saem entre as 6:30 e as 8:00 da manhã, regressam entre as 12:30 e as 13:00, saem entre as 13:30 e as 14:00 e regressam entre as 18:30 e as 21:00;

Na secção do Estado da Arte foi apresentado uma lista com os veículos elétricos mais representados que são considerados para esta simulação. Em especial, os três veículos que representam o Perfil 1 têm capacidades bastantes superiores ao valores atuais, de modo a aumentar a complexidade do problema. Assim, o parque de estacionamento deste caso de estudo exprime-se na seguinte tabela:

Tabela 27: Caracterização dos EVs para um Parque de Estacionamento de 100 Lugares

Quota de Mercado	Modelo	Capacidade [kWh]	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4
16%	Nissan Leaf	40	0	12	3	1
13%	Tesla Model 3	75	0	10	2	1
10%	BMW i3	42	0	7	2	1
10%	Renault ZOE	41	0	7	2	1
9%	Jaguar I-Pace	90	0	6	2	1
8%	Mercedes E300	13,5	0	6	1	1
8%	BMW 530e	12	0	6	1	1
7%	Mini Countrymen	7,6	0	6	1	0
6%	Hyundai Kauai	39	0	4	1	1
5%	Mitsubishi Outlander	12	0	3	1	1
5%	Smart Fortwo	17,6	0	3	1	1
3%		200	3	0	0	0

Em primeiro lugar, estudaram-se os limites de cada nível do modelo de gestão do parque de estacionamento. Para as simulações, considerou-se um parque de estacionamento com 12 carregadores de 22kW para o qual

apenas se variou o valor de cada limite tendo-se examinado o impacto individual de cada limite e novas combinações de limites entre níveis como se podem observar na tabela em baixo.

Tabela 28: Caracterização do Estudo dos Limites

	Normal	Lim. 1	Lim. 2	Lim. 3	Comb. 1	Comb. 2	Comb. 3
Level 1	40	100	0	0	30	20	50
Level 2	85	100	100	0	70	60	70
Level 3	100	100	100	100	90	80	100

Devido à dimensão do parque de estacionamento, os EVs serão agrupados por perfil de utilização e pelo seu modelo. Com isto, pretende-se produzir dados que permitam a gerar conclusões relativamente a este parque de estacionamento. Assim, vão ser obtidas as duas tabelas seguintes, a primeira (Tabela 29) corresponde aos valores médios de bateria para cada grupo e a segunda (Tabela 30) aos valores médios de potência entregue a cada grupo.

Tabela 29: Valores Médios Finais dos Grupos e Perfis de EVs em Percentagem - Limites

Caso	Valor Médio do SoC das Baterias EVs [%]									
	200kWh	Leaf	Model 3	Zoe	I3	E300	I-Pace	530e	Mini	Outlander
Normal	100	91,95	80,29	80,65	96,32	80,68	75,14	100	94,43	100
Lim. 1	100	92,05	80,64	80,38	94,95	80,75	78,46	100	90,17	100
Lim. 2	100	92,84	76,85	75,91	94,00	79,31	77,02	100	89,62	100
Lim. 3	100	91,57	79,73	80,83	93,24	82,28	79,97	91,65	91,68	100
Comb. 1	100	91,99	79,22	80,07	95,45	84,31	77,59	93,65	89,35	99,03
Comb. 2	100	92,77	80,20	78,26	96,71	84,29	76,97	100	85,71	100
Comb. 3	100	92,35	76,61	80,46	96,42	79,72	76,61	100	90,87	100

Kauai	Smart	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4
100	100	100	90,50	100	83,70
100	99,30	100	90,10	100	87,52
100	100	100	89,24	100	85,80
99,69	98,73	100	89,11	100	84,67
99,19	100	100	89,19	100	85,65
100	100	100	90,35	100	85,67
100	100	100	88,99	100	89,94

Pode-se analisar que, neste caso, os EVs que não saem do parque (que pertencem ao grupo Perfil 1) apresentam o carregamento completo das suas baterias. Adicionalmente, os grupos Perfil 3, Outlander, Kauai e Smart também apresentam carregamentos completos independentemente dos limites. Os EVs com capacidades maiores como o Tesla Model 3 e o Jaguar I-Pace apresentam carregamentos de bateria até a valores próximos de 80%. Embora sejam testados diferentes combinações de limites para cada nível, apenas se verificam alterações inferiores a 5% nos valores médios das baterias dos vários grupos.

Tabela 30: Energia Média entregue aos Grupos e Perfis em kWh - Limites

Casos	Energia Média [kWh]								
	200kWh	Leaf	Model 3	Zoe	I3	E300	I-Pace	530e	Mini
Normal	200	57,25	85,46	64,19	69,28	31,04	108,75	28,17	17,11
Lim. 1	200	56,77	88,95	64,67	69,98	31,23	111,99	27,51	16,17
Lim. 2	200	57,20	85,69	61,77	67,71	32,05	111,45	28,64	15,78
Lim. 3	200	56,46	87,07	63,31	66,50	31,40	113,48	27,42	16,54
Comb. 1	200	57,54	85,26	65,44	67,38	32,33	111,55	27,39	16,63
Comb. 2	200	57,08	87,16	62,63	69,37	31,67	106,51	28,00	15,60
Comb. 3	200	57,60	85,86	63,69	69,54	30,77	108,51	27,68	16,97

Outlander	Kauai	Smart	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4
25,50	80,10	36,32	200	61,72	25,45	91,95
26,56	78,07	37,81	200	62,03	25,55	92,70
26,04	80,31	37,51	200	61,05	25,55	93,84
25,23	78,77	36,81	200	61,53	25,52	89,95
24,92	76,07	36,15	200	61,21	25,46	91,49
25,08	78,75	38,88	200	61,50	25,47	91,00
25,11	78,75	36,86	200	61,41	25,51	91,78

Uma análise da Tabela 30 revela que um parque de estacionamento com 100 lugares apresenta uma elevada exigência energética para a rede. Naturalmente, os EVs com maior capacidade de bateria exigem também uma injeção de uma maior quantidade de energia como podemos ver pelo grupo que não sai do parque (200kWh) e os modelos Model 3 e I-Pace. Para estes grupos, um estado de bateria inferior a EVs com menor capacidade mas estado de bateria superiores pode significar uma maior autonomia de condução devido à capacidade de armazenamento dos primeiros. Os dados também demonstram que é necessário entregar 200kWh para o carregamento completo de um EV pertencente ao Perfil 1 enquanto que para carregar totalmente a bateria de um Mitsubishi Outlander são preciso 12,5kW, 6,25% dos 200kWh. No entanto, em média, um EV Outlander recebe aproximadamente 25kWh porque estes veículos saíram do parque e usaram as suas baterias ao longo da simulação.

Os dados da Tabela 30 juntamente com a Figura 36 mostram que a potência máxima entregue pelos carregadores durante um período é de 264kW. Esta potência será atingida durante 3 intervalos para cada simulação que representam os momentos em que todos os EVs estão estacionados, ou seja, a carregar e a exigência energética aumenta.

Em especial, na Figura 36 observa-se a repetição de um padrão que se repete para cada dia na simulação. Neste padrão observa-se a redução da potência de carregamento da potência nominal até potências à volta de 25kW à medida que os EVs vão saindo do parque de estacionamento durante a manhã, um pico durante a hora de almoço e o aumento da exigência energética até à potencia de 264kW que representa o retorno dos EVs ao parque.

Aquando da comparação dos gráficos da distribuição temporal de energia pelos EVs entre os casos estudados, entende-se que as diferenças são desprezáveis pelo que apenas se apresenta o gráfico para situação 'Normal'.



Figura 36: Energia Distribuída pelo Parque de Estacionamento durante a Simulação - 100 EVs - 576 Períodos

Uma vez que a variável 'minSOC' é individual, não será estudada porque não acrescenta informação ao problema. Assim, estudou-se a progressão temporal da Função Objetivo que se pode ver na Figura 37.

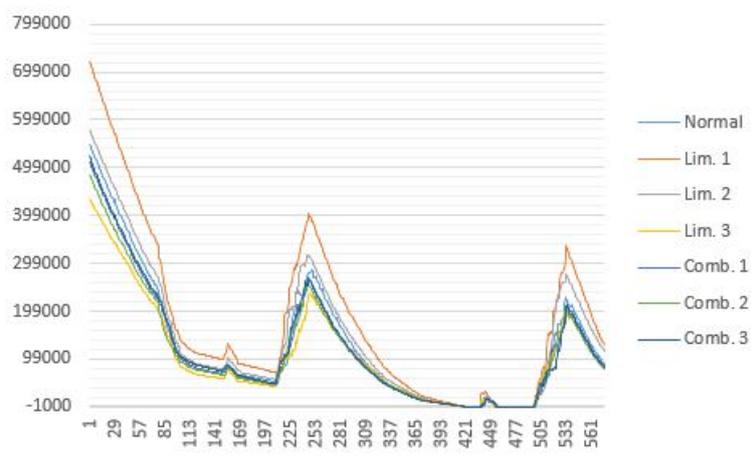


Figura 37: Progressão Temporal da Função Objetivo no estudo dos limites - 100 EVs - 576 Períodos

A análise dos valores obtidos mostra que a variação dos limites tem um impacto direto nos valores da função objetivo dado que quanto maiores forem os limites, mais EVs serão agrupados dentro dos vários níveis que se traduz num aumento das penalizações. Como se pode observar, a situação Lim. 1 agrupa todos os EVs nos 3 níveis, logo apresenta para todos os períodos o maior valor da função objetivo. Observa-se que todas as situações atingem valores negativos que são interpretados como o carregamento completo de todos os EVs estacionados nesses períodos. Logo, conclui-se que estes parâmetros são mais relevantes para estacionamentos de curta duração uma vez que, com o passar do tempo, as funções objetivo tendem a convergir para os mesmos valores.

De seguida, estudou-se a variação das penalização para cada nível de bateria dos EVs. Neste estudo analisa-se a relação entre as penalizações associadas aos três níveis e as restantes penalizações do problema enquanto no estudo anterior procurou-se entender as consequências da variação dos limites de cada nível. Para as simulações vai-se estudar na mesma um parque de estacionamento com 12 carregadores de 22kW para os quais se variam os pesos das penalizações como se pode ver na tabela em baixo.

Tabela 31: Caracterização do Estudo das Penalizações

	Normal	Up 1	Up 2	Down 1	Down 2	Niv 1	Niv 2	Niv 3
Level 1	50	60	70	40	30	70	50	50
Level 2	40	50	60	30	20	40	60	40
Level 3	30	35	40	20	10	30	30	60

Uma vez que se altera o peso das penalizações são esperadas duas coisas. Em primeiro lugar, para cada situação, os valores da função objetivo deveram ser diferentes uma vez que o mesmo EV é penalizado de modo diferente. Em segundo lugar, o peso relativo de penalizações como VIP vai ser alterado pelo que o carregamento também deverá ser diferente. Durante esta análise, a penalização do nível inferior será sempre superior ao nível directamente a cima para que seja dada prioridade aos EVs com baterias mais esgotadas.

Nas Tabelas 32 e 33 estão expostos os Valores Médios finais de cada grupo e perfil e a potência média entregue a cada grupo e perfil, respetivamente.

Tabela 32: Valores Médios Finais dos Grupos e Perfis de EVs em Percentagem - Penalização

Casos	Valor Médio do SoC das Baterias dos EVs [%]									
	200kWh	Leaf	Model 3	Zoe	I3	E300	I-Pace	530e	Mini	Outlander
Normal	100	91,95	80,29	80,65	96,32	80,68	75,14	100	94,43	100
Up 1	100	89,77	81,18	80,49	97,47	82,10	77,92	100	89,93	100
Up 2	100	91,28	79,61	80,10	94,90	83,06	76,32	98,72	90,55	100
Down 1	100	93,11	81,50	81,08	96,19	86,70	75,91	98,86	92,92	100
Down 2	100	93,15	77,69	78,62	95,34	84,12	77,21	100	87,05	96,79
Niv 1	100	91,97	79,46	80,56	97,30	80,87	77,91	99,76	90,26	100
Niv 2	100	92,09	79,28	80,48	95,41	81,25	74,70	95,40	93,36	100
Niv 3	100	92,20	81,83	79,66	97,16	86,26	78,38	100	91,53	100

Kauai	Fortwo	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4
100	100	100	90,50	100	83,70
99,93	100	100	90,21	100	85,46
100	100	100	89,26	100	87,08
100	100	100	90,98	100	87,06
98,74	100	100	89,33	100	83,91
100	98,04	100	90,12	100	84,49
100	100	100	89,40	100	83,92
100	100	100	90,91	100	87,77

Tabela 33: Potência Média entregue aos Grupos e Perfis em kWh - Penalização

Casos	Potência Média [kWh]								
	200kWh	Leaf	Model 3	Zoe	I3	E300	I-Pace	530e	Mini
Normal	200,07	57,25	85,46	64,19	69,28	31,04	108,75	28,17	17,11
Up 1	200,08	56,41	87,15	63,71	69,01	30,94	110,46	27,55	15,85
Up 2	200,01	56,22	86,51	64,16	68,46	31,05	110,08	28,01	16,27
Down 1	200,04	56,99	87,74	64,29	68,59	31,77	106,41	27,95	16,41
Down 2	200,05	57,19	86,18	64,45	69,24	31,70	108,94	27,88	15,57
Niv 1	200,07	56,45	87,11	63,97	69,13	30,76	108,30	28,49	16,80
Niv 2	200,10	56,91	87,13	64,35	69,83	31,42	106,66	26,59	16,16
Niv 3	200,04	57,22	90,19	63,40	68,92	32,25	110,51	27,87	16,31

Outlander	Kauai	Fortwo	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4
25,50	80,10	36,32	200,07	61,72	25,45	91,95
25,90	79,89	37,42	200,08	62,28	25,54	88,77
25,17	78,92	36,87	200,01	61,39	25,55	91,88
24,94	79,47	36,56	200,04	61,40	25,49	93,00
25,22	76,89	36,86	200,05	61,55	25,49	91,59
25,31	79,98	36,12	200,07	61,84	25,52	90,79
24,90	77,97	37,32	200,10	61,11	25,72	93,03
24,98	79,86	37,01	200,04	62,39	25,67	93,56

A análise das duas tabelas anteriores mostra que não existem alterações significativas devido à alteração dos valores da penalização. Logo, à semelhança do estudo anterior, a relevância das penalizações é superior para menores intervalos de estacionamento.

Verifica-se que quanto maior for a penalização, maior será a urgência do modelo em minimizar o somatório de penalizações do EV. Embora não se vejam a alterações no carregamento dos EVs, a progressão da função objetivo (Figura 38) apresenta bastantes alterações. Observa-se que o aumento de uma ou mais penalizações leva a que os valores obtidos sejam bastante superiores durante toda a simulação como é o caso das situações Up 1 e Up 2. O aumento das penalizações está diretamente ligado à reatividade da função objetivo a mudanças uma vez que as entradas EVs provocam alterações bastante superiores do que as restantes opções.

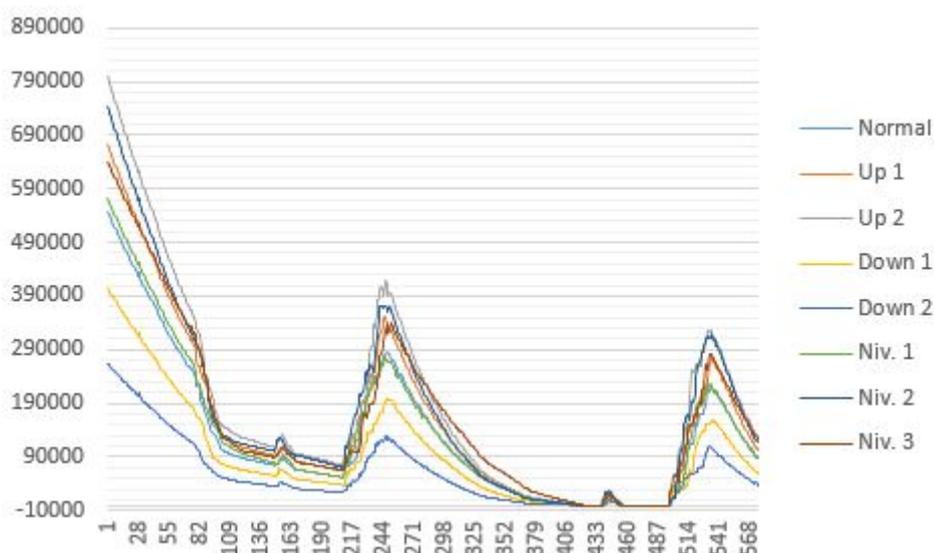


Figura 38: Progressão Temporal da Função Objetivo no estudo das penalizações - 100 EVs - 576 Períodos

Na fase final do caso de estudo, pretende-se aplicar o cenário desenhado anteriormente a possíveis arquiteturas de carregamento que possam vir a ser aplicadas em parques de estacionamento. Para uma infraestrutura destas dimensões, surgem várias questões de dimensionamento em relação à potência contratada à rede, o número de carregadores que devem ser instalados e o número de lugares que cada carregador deve servir. Se por um lado, o desempenho do parque de estacionamento está diretamente relacionado com os carregadores instalados. Por outro lado, a potência contratada à rede, a instalação e compra de carregadores têm um elevado peso económico pelo que se deve considerar ambos os parâmetros durante a construção de um parque de estacionamento adaptado a EVs.

Assim, neste caso, para avaliar o desempenho do parque de estacionamento não se recorre apenas a parâmetros técnicos que avaliem o carregamento dos EVs mas também a parâmetros económicos. De acordo com o Compêndio 2020 da Volkswagen [33] e os preços comerciais disponíveis para carregadores, o investimento num carregador divide-se em três categorias principais. A primeira está associada à construção e adaptação do espaço e instalação do carregador, a segunda categoria corresponde ao preço do equipamento de carregamento sendo que a última categoria está associada ao custo de operação anual. Deste modo, na Tabela 34 pode-se observar os custos associados a carregadores individuais usado nesta fase do estudo.

Tabela 34: Custos associados a Carregadores Individuais

Potência do Carregador	Instalação	Hardware	Custo Operacional Anual	Custo por Kilowatt
3,7kW	- €	300,00 €	- €	81,08€
7,2kW	300,00 €	600,00 €	- €	125,00€
10kW	600,00 €	1 000,00 €	300,00 €	190,00€
11kW	600,00 €	1 200,00 €	350,00 €	195,45€
22kW	1 500,00 €	2 100,00 €	600,00 €	190,91€
50kW	15 000,00 €	26 000,00 €	1 000,00 €	840,00€
350kW	25 000,00 €	75 000,00 €	2 000,00 €	291,00€

O primeiro carregador representa a potência de uma tomada doméstica sendo o carregamento mais lento devido à baixa potência, não tem qualquer custo de manutenção nem de instalação mas deve-se inserir uma tomada mais segura por prevenção. O segundo carregador, 7,2kW, já apresenta custo de instalação de uma tomada

industrial. Os carregadores de 10kW e 11kW estão associados a unidades de carregamento também conhecida por Wallbox, logo apresentam custos superiores de modo a fazer um carregamento AC. O carregador 22kW considerado será uma estação de carregamento à semelhança dos carregadores de 50kW e 350kW. O carregador de 22kW fará um carregamento AC enquanto os dois carregadores anteriores são DC obrigando a um investimento mais elevado em todos os aspectos. Observa-se à partida que o custo operacional por ano representa a menor fração da despesa. Foram consideradas outras potências de carregamento que foram desprezadas por não terem representação comercial. Em especial, nota-se que a exigência da instalação de carregadores DC que tornam o preço de cada kilowatt bastante mais elevado ao que possivelmente se junta o preço da energia contratada para o parque de estacionamento.

Tendo em conta os custos associados ao parque de estacionamento, pretende-se chegar a um compromisso entre a qualidade do serviço prestado e um dimensionamento da arquitetura de carregamento que permita o menor gasto económico sem prejudicar o primeiro critério. Para tal, foram desenvolvidas várias hipóteses que estão representadas na tabela 35.

Tabela 35: Descrição das Hipóteses Estudadas - 100 Lugares e 576 Períodos

Número de Carregadores	10	10	20	20	10	12	6	15	1
Potência do Carregador	10kW	11kW	10kW	11kW	22kW	22kW	50kW	22kW	350kW
Potência Total	100kW	110kW	200kW	220kW	220kW	264kW	300kW	330kW	350kW

Número de Carregadores	7	33	100	17	30	14	100	33
Potência do Carregador	50kW	11kW	3,7kW	22kW	22kW	50kW	7,2kW	22kW
Potência Total	350kW	363kW	370kW	374kW	660kW	700kW	720kW	726kW

As hipóteses descritas na Tabela 35 estão ordenadas tendo em conta potência total do parque de estacionamento. A primeira hipótese apresenta uma potência máxima de 100kW enquanto que a última hipótese apresenta potências superiores a 700kW. Os carregadores mais comuns encontrados nas hipóteses possuem potências entre 10kW e 22kW uma vez que permitem injetar potências mais elevadas sem ser necessário um elevado investimento.

Para o dimensionamento do investimento total de cada hipótese foram tomadas supõe-se que qualquer carregador considera todos os custos associados à sua instalação, não se tem conta as despesas externas aos carregadores como o contrato de potência das infraestruturas e que qualquer EV aceita ser carregado por qualquer potência.

Através do cruzamento os dados das Tabela 34 e 35, obtém-se o investimento necessário para a construção de cada hipótese. Assim, agrupou-se na Tabela 36 todos os custos associadas a cada hipótese.

Tabela 36: Investimento Necessário para o desenvolvimento de cada Arquitetura

Hipótese	Potência Total	Número de Carregadores	Instalação	Hardware	C.O/Ano	Investimento
10CS-10kW	100kW	10	6 000,00 €	10 000,00 €	3 000,00 €	19 000,00 €
10CS-11kW	110kW	10	6 000,00 €	12 000,00 €	3 500,00 €	21 500,00 €
20CS-10kW	200kW	20	12 000,00 €	20 000,00 €	6 000,00 €	38 000,00 €
20CS-11kW	220kW	20	12 000,00 €	24 000,00 €	7 000,00 €	43 000,00 €
10CS-22kW	220kW	10	15 000,00 €	21 000,00 €	6 000,00 €	42 000,00 €
12CS-22kW	264kW	12	18 000,00 €	25 200,00 €	7 200,00 €	50 400,00 €
6CS-50kW	300kW	6	90 000,00 €	156 000,00 €	6 000,00 €	252 000,00 €
15CS-22kW	330kW	15	22 500,00 €	31 500,00 €	9 000,00 €	63 000,00 €
1CS-350kW	350kW	1	25 000,00 €	75 000,00 €	2 000,00 €	102 000,00 €
7CS-50kW	350kW	7	105 000,00 €	182 000,00 €	7 000,00 €	294 000,00 €
33CS-11kW	363kW	33	19 800,00 €	39 600,00 €	11 550,00 €	70 950,00 €
100CS-3,7kW	370kW	100	0,00 €	30 000,00 €	0,00 €	30 000,00 €
17CS-22kW	372kW	17	25 500,00 €	35 700,00 €	10 200,00 €	71 400,00 €
30CS-22kW	660kW	30	45 000,00 €	63 000,00 €	18 000,00 €	126 000,00 €
14CS-50kW	700kW	14	210 000,00 €	364 000,00 €	14 000,00 €	588 000,00 €
100CS-7,2kW	720kW	100	30 000,00 €	60 000,00 €	0,00 €	90 000,00 €
33CS-22kW	726kW	33	49 500,00 €	69 300,00 €	19 800,00 €	138 600,00 €

Numa primeira análise identifica-se que a opção mais dispendiosa é 14CS-50kW que requer um investimento de 588 000€ enquanto que a hipótese mais conservadora é 10CS-10kW que investe 19 000€. A hipótese 100CS-3,7kW é a única hipótese que não apresenta custos de instalação extra (porque se tratam de tomadas tradicionais) e apenas as hipóteses com carregadores com capacidade inferior a 10kW não necessitam de manutenção ao longo do ano. Em termos de instalação, as hipóteses com potência total inferior a 100kW e a hipótese 100CS-3,7kW são as únicas que apresentam custos de instalação inferiores a 10 000€ sendo que as hipóteses com 20 carregadores têm valores próximos deste limite. Adicionalmente, observa-se que as três hipóteses que combinam diferentes números de carregadores de 50kW têm o custo de instalação mais elevado. Do ponto de vista do equipamento técnico observa-se que qualquer hipótese representa uma despesa igual ou superior a 10 000€ sendo que apenas as hipóteses com combinações de carregadores com 50kW apresentam valores superiores a 100 000€. Em relação ao custo operacional anual, observa-se que a partir dos hipóteses com carregadores semi-rápidos e potência total superiores a 360kW, este valor é obrigatoriamente superior a 10 000€. Para potências totais similares a 100kW, o investimento total deve aproximar-se dos 20 000€ enquanto que para as restantes potências pode variar.

A partir das simulações das hipóteses expostas em cima obteve-se dados relativos ao carregamento dos EVs, da energia consumida pelo parque de estacionamento e entregue a cada grupo de EVs, a progressão dos função objetivo e, ainda, a evolução temporal da variável 'minSOC'. Em especial, os EVs com capacidade de 200kWh passaram apenas a ser representados no Perfil 1 pois são os únicos EVs desse grupo.

Ao fim de 576 períodos, os valores médios finais de cada grupo e perfil estão expostos na Tabela 37.

Tabela 37: Valores Médios Finais da Bateria para cada Grupo e Perfil - 100 Lugares e 576 Períodos

Hipótese	Valor Médio do SoC das Baterias dos EVs [%]								
	Leaf	Model 3	Zoe	I3	E300	I-Pace	530e	Mini	Outlander
10CS-10kW	68,70	58,68	60,95	60,89	60,12	60,71	76,29	79,12	91,96
10CS-11kW	71,42	60,25	63,16	63,37	70,53	61,41	77,66	80,67	90,60
20CS-10kW	77,01	68,75	76,19	68,03	100,00	66,20	100,00	100,00	100,00
20CS-11kW	78,10	69,05	75,01	77,19	100,00	68,51	100,00	100,00	100,00
10CS-22kW	90,59	68,76	80,83	77,56	100,00	69,20	100,00	100,00	100,00
12CS-22kW	92,53	80,51	79,48	96,17	94,12	74,69	99,12	100,00	100,00
6CS-50kW	96,07	81,47	93,62	85,43	94,93	79,14	100,00	100,00	100,00
15CS-22kW	98,59	81,79	88,41	90,44	94,05	82,14	100,00	100,00	100,00
1CS-350kW	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
7CS-50kW	98,71	83,63	100,00	100,00	100,00	87,97	99,29	100,00	100,00
33CS-11kW	94,66	80,51	90,19	87,81	100,00	73,58	100,00	100,00	100,00
100CS-3,7kW	88,68	74,73	82,99	80,55	100,00	68,37	100,00	100,00	100,00
17CS-22kW	97,76	77,88	100,00	94,43	100,00	77,43	100,00	100,00	100,00
30CS-22kW	100,00	99,73	100,00	100,00	100,00	82,98	100,00	100,00	100,00
14CS-50kW	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
100CS-7,2kW	97,48	90,71	94,26	100,00	100,00	82,75	100,00	100,00	100,00
33CS-22kW	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	90,33	100,00	100,00	100,00

Hipótese	Valor Médio Bateria EVs [%]					
	Kauai	Smart	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4
10CS-10kW	56,14	65,97	58,17	62,72	100,00	50,82
10CS-11kW	58,67	73,55	59,74	65,66	100,00	57,05
20CS-10kW	72,78	96,50	65,25	78,04	100,00	72,06
20CS-11kW	72,03	100,00	73,39	79,45	100,00	75,73
10CS-22kW	83,57	85,60	100,00	83,22	100,00	75,38
12CS-22kW	100,00	100,00	100,00	89,59	100,00	85,02
6CS-50kW	87,49	100,00	100,00	89,53	100,00	93,61
15CS-22kW	100,00	100,00	100,00	91,79	100,00	91,56
1CS-350kW	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
7CS-50kW	100,00	100,00	100,00	95,83	100,00	94,44
33CS-11kW	89,28	100,00	88,00	88,08	100,00	97,35
100CS-3,7kW	76,77	100,00	88,80	85,05	100,00	74,79
17CS-22kW	98,28	100,00	100,00	92,11	100,00	95,96
30CS-22kW	100,00	100,00	100,00	97,98	100,00	98,48
14CS-50kW	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
100CS-7,2kW	100,00	100,00	100,00	96,33	100,00	88,44
33CS-22kW	100,00	100,00	100,00	98,76	100,00	100,00

Da Tabela 37 retira-se que todos os EVs com um comportamento aleatório (Perfil 3) apresentam um carregamento completo independentemente da arquitetura do parque de estacionamento. Isto deve-se a períodos de estacionamento mais prolongados que permite que o modelo faça o carregamento completo.

Em relação ao Perfil 1, identifica-se que as combinações de carregadores com potência total igual ou inferiores a 210kW são incapazes de fazer o carregamento completo destes EVs uma vez que conciliam dois fatores, cada

carregador tem vários lugares para carregar e a potência dos carregadores é baixa. Esta observação confirma-se uma vez que a hipótese 33CS-11kW também não faz o carregamento completos dos EVs do Perfil 1 embora cada carregador apenas esteja responsável por 3 lugares. Adicionalmente, a simplicidade da hipótese 100CS-3,7kW não permite que o modelo execute qualquer tipo de otimização levando a que esta hipótese apenas apresente um valor médio de bateria de 88,8%.

Apenas as hipóteses 1CS-350kW e 14CS-50kW conseguem o carregamento completo para os EVs pertencentes ao Perfil 2 que representa a maioria dos EVs (70%) no parque de estacionamento. Em relação a este grupo de EVs, entende-se que os dois fatores que mais afetam o valor médio final das baterias são: a potência total do parque de estacionamento e o número de lugares associados a cada carregador. Este último está diretamente ligado com o método proposto uma vez que a distribuição de potência pelos diferentes EVs está na base deste controlador. Logo, como esperado, as hipóteses com maior potência total apresentam os melhores desempenhos em relação a este perfil.

Em relação ao Perfil 4, que representa os EVs que saiem do parque duas vezes por dia, 3 hipóteses apresentam um carregamento total dos 10 EVs pertencentes a este grupo como se pode ver na tabela em cima. Para estes veículos, o carregamento é altamente dependente da distribuição da potência pelos carregadores uma vez que os seus períodos de estacionamento são muito curtos. Logo, os parques de estacionamento com carregadores com potências mais elevadas obtiveram os melhores desempenhos para este grupo.

Em termos percentuais, os EVs com maior capacidade (Tesla Model 3 e Jaguar I-PACE) são os veículos com baterias menos carregadas no final da simulação porque é necessário uma maior quantidade de energia para o seu carregamento completo. Pelo contrário, os veículos híbridos que apresentam as menores capacidades, obtêm os melhores desempenhos.

Os resultados obtidos na tabela anterior estão diretamente associados com a energia entregue pelos carregados aos EVs. Na Tabela 38 pode-se observar a potência média entregue a cada grupo de EVs para cada hipótese sendo que de seguida são estudadas os diagramas de carga de cada hipótese.

Tabela 38: Distribuição da Energia Média para cada Grupo e Perfil - 100 Lugares e 576 Períodos

Hipóteses	Energia Média [kWh]							
	Leaf	Model 3	Zoe	I3	E300	I-Pace	530e	Mini
10CS-10kW	28,93	33,33	35,09	35,42	27,38	41,51	23,45	14,97
10CS-11kW	32,10	35,79	38,01	38,40	29,32	44,86	23,42	15,09
20CS-10kW	48,62	60,74	54,67	50,07	31,64	68,00	26,79	15,47
20CS-11kW	50,42	65,81	56,60	55,72	31,65	73,56	27,06	15,47
10CS-22kW	54,03	67,88	58,54	56,98	31,64	81,42	27,08	15,47
12CS-22kW	57,26	88,25	63,88	69,18	31,18	109,31	26,97	15,47
6CS-50kW	56,21	92,08	67,71	67,22	31,10	125,14	27,08	15,47
15CS-22kW	59,42	94,17	70,09	64,84	31,29	112,53	27,08	15,47
1CS-350kW	62,17	117,32	73,09	70,38	31,64	150,67	27,08	15,47
7CS-50kW	56,63	97,84	74,71	72,49	31,64	130,85	26,99	15,47
33CS-11kW	62,10	90,07	66,78	64,78	31,64	96,74	27,08	15,47
100CS-3,7kW	58,70	79,80	63,65	59,84	30,73	82,36	26,13	15,47
17CS-22kW	62,05	93,12	74,22	68,88	31,64	106,66	27,08	15,47
30CS-22kW	64,50	120,58	74,31	73,59	31,64	122,20	27,08	15,47
14CS-50kW	62,22	122,31	75,24	73,92	31,64	152,49	27,08	15,47
100CS-7,2kW	62,72	111,51	68,81	70,23	31,49	127,09	27,11	15,47
33CS-22kW	64,50	119,94	74,31	71,76	31,64	136,80	27,08	15,47

Hipóteses	Energia Média [kWh]						
	Outlander	Kauai	Smart	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4
10CS-10kW	23,52	42,04	27,75	116,33	29,38	25,33	49,96
10CS-11kW	23,35	44,58	29,45	119,47	32,20	25,33	50,47
20CS-10kW	24,48	61,25	36,23	130,50	47,82	25,33	64,82
20CS-11kW	24,48	62,58	36,96	146,78	50,10	25,34	72,75
10CS-22kW	24,48	70,20	34,42	200,00	52,19	25,33	79,70
12CS-22kW	24,48	78,54	36,72	200,00	61,38	25,33	92,97
6CS-50kW	24,48	79,95	36,96	200,00	63,09	25,33	94,69
15CS-22kW	24,48	74,88	36,96	200,00	63,24	25,33	95,20
1CS-350kW	24,48	78,39	36,96	200,00	72,08	25,33	102,19
7CS-50kW	24,48	79,63	36,78	200,00	66,29	25,33	97,22
33CS-11kW	24,48	72,59	36,67	176,00	61,43	25,33	84,88
100CS-3,7kW	23,32	65,08	34,44	177,60	58,78	25,33	61,74
17CS-22kW	24,48	79,08	36,96	200,00	63,58	25,33	94,66
30CS-22kW	24,48	79,41	36,96	200,00	71,75	25,33	99,78
14CS-50kW	24,48	79,95	36,96	200,00	74,06	25,33	103,74
100CS-7,2kW	24,51	75,32	36,16	200,00	71,63	25,34	79,99
33CS-22kW	24,48	79,95	36,96	200,00	73,42	25,33	96,88

A partir da tabela consegue-se identificar a potência necessária para o carregamento completo de certos EVs sabendo que esses veículos não apresentam baterias completamente descarregadas. No caso dos EVs do Perfil 1, são necessários 2400kW para que os EVs tenham uma bateria totalmente carregada. Verifica-se que para os 70 EVs devem ser distribuídos em média cerca de 870kW para que os veículos estejam totalmente carregados. A potência média necessária a entregar aos EVs do Perfil 3 para os carregar totalmente é 304kW. Para o Perfil 4 são

necessários, em média, 1160kW para os EVs estarem com a bateria a 100%.

Da análise dos diagramas de carga de cada arquitetura pode-se observar os diferentes graus de complexidade e as suas limitações à otimização do modelo por parte do método proposto. O estudo começa as arquiteturas de menor potência total para o qual se agrupam de acordo com o mesmo parâmetro.

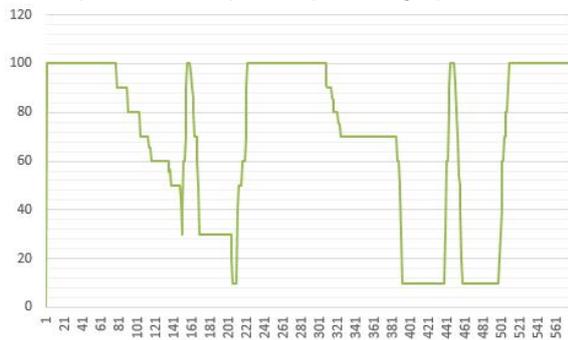


Figura 39: Diagrama de Carga - 10CS-10kW



Figura 40: Diagrama de Carga - 10CS-11kW

Da análise das Figuras 39 e 40 retira-se que ambas as arquiteturas apresentam o mesmo padrão de utilização, como já foi referido no estudo das regras dos parque de estacionamento. Embora tenham o mesmo número de carregadores, a diferença de 1kW na potência de cada carregador leva a que a hipótese 10CS-11kW tenha uma potência máxima 10kW superior à hipótese 10CS-10kW. Esta diferença causa um carregamento mais lento dos EVs da última hipótese o que permite entender que a hipótese 10CS-10kW tem um atraso no carregamento em relação à hipótese 10CS-11kW. Este atraso verifica-se pela redução antecipada da potência distribuída aos EVs pela hipótese 10CS-11kW enquanto que a hipótese 10CS-10kW apenas redistribui a potência nos períodos seguintes. Em particular, observa-se que nos períodos mais calmos, existe apenas um carregador a entregar potência aos EVs.

As Figuras 41 a 44 ilustram os diagramas de carga das hipóteses com potência total superior a 200kW mas inferior a 300kW.

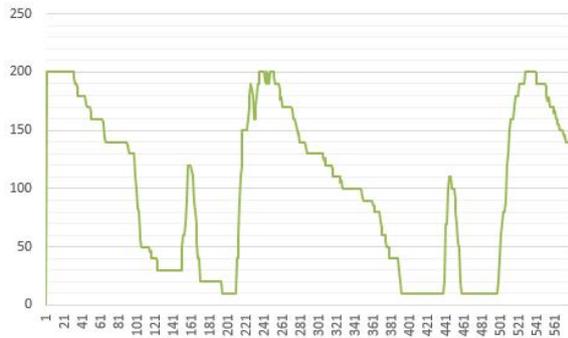


Figura 41: Diagrama de Carga - 20CS-10kW



Figura 42: Diagrama de Carga - 20CS-11kW



Figura 43: Diagrama de Carga - 10CS-22kW



Figura 44: Diagrama de Carga - 12CS-22kW

O atraso observado nas duas hipóteses anteriores torna-se visível agora para as hipóteses 20CS-10kW e 20CS-11kW em que a potência máxima disponível é 200kW e 220kW, respetivamente. Adicionalmente, observa-se que

existe apenas um carregador a funcionar nos períodos vazios o que representa 5% da potência total disponível de ambas as hipóteses. O aumento de número de carregadores nestas hipóteses aumentam a potência total do parque de estacionamento e levam a uma diminuição para metade do número de lugares por carregador que permite o aumento de entrega de energia a cada EV, melhorando o desempenho de todo o parque de estacionamento.

As hipóteses 10CS-22kW e 12CS-22kW apresentam potências máximas de 220kW e 264kW por essa ordem. Uma vez que a potência disponível em relação às hipóteses 10CS-10kW e 10CS-11kW é bastante superior, observa-se que se atinge a potência máxima durante menos períodos. Este fator indica que o aumento da potência disponível permitiu um maior aumento da energia entregue e, posteriormente, redistribuição da potência injetada em cada EV. Esta análise traduz-se no diagrama de carga como a redução do número de períodos de pico, na diminuição percentual da potência dos picos associados com o estacionamento dos EVs a meio do dia e nos períodos em que nenhum carregador está a entregar energia a algum EV. Em particular, nota-se que para o intervalo de períodos de 457 ao 497, os EVs estacionados no parque estão totalmente carregados.

As próximas Figuras apresentam os diagramas de carga para as hipóteses com potências máximas de 300kW e 330kW, respetivamente.



Figura 45: Diagrama de Carga - 6CS-50kW



Figura 46: Diagrama de Carga - 15CS-22kW

Embora ambas as hipóteses apresentem valores de potência próximos, cada arquitetura terá diferentes limitações de otimização. Por um lado, a hipótese 6CS-50kW por ter 6 carregadores, permite uma otimização mais vasta da potência injetada nos EVs uma vez que é possível injetar 50kW num só EV ou outra combinação consoante os veículos estacionados e as suas penalizações. Por outro lado, a hipótese 15CS-22kW garante um maior nível de energia contínua entregue aos EVs uma vez que são atribuídos menos lugares a cada carregador devido ao maior número de unidades de carregamento. Adicionalmente, observa-se que ambas as hipóteses atingem o carregamento completo dos EVs estacionados durante a simulação.

As próximas cinco Figuras correspondem aos diagramas de carga das Hipóteses 1CS-350kW (Figura 47), 7CS-50kW (Figura 48), 33CS-11kW (Figura 49), 100CS-3,7kW (Figura 50) e 17CS-22kW (Figura 51). A diferença entre as potências totais associadas a estas hipóteses é inferior a 25kW pelo que se vão estudar em conjunto.

A primeira hipótese apresenta apenas um carregador de 350kW capaz de carregamentos super-rápidos ou de distribuir a sua potência entre mais EVs. Pelo que geralmente apresenta dois modos de operar, ativo em que usa toda a sua potência para o carregamento dos EVs ou inativo para o qual todos os EVs do parque de estacionamento se encontram carregados. Para este caso, assume-se que os EVs aceitam este tipo de carregamento super-rápido.

A hipótese com 7 carregadores de 50kW apresenta menor liberdade na distribuição da potência do que a hipótese anterior. Esta observação pode ser verificada no diagrama de carga que mostra os diferentes patamares de potência injetada por período.

A Hipótese 33CS-11kW apresenta um comportamento mais linear porque cada carregador apenas tem de assegurar o carregamento de 3 EVs. Isto diminui a complexidade do problema de otimização uma vez que a potência de cada carregador apenas pode ser distribuída por 3 EVs no máximo.

A quarta hipótese representa o uso de cem tomadas domésticas para o carregamento dos EVs. Um parque com esta arquitetura teria um potencial de 370kW sendo que cada carregador funciona como uma variável binária em que ou está 'off' ou então entrega 3,7kW a um EV. O comportamento de cada carregador pode ser visto na descida linear da potência entregue pelo parque aos EVs no períodos intermédios da simulação.

Por fim, a quinta hipótese tem uma potência máxima de 372kW. A adição de dois carregadores com capacidade de 22kW em relação à hipótese 15CS-22kW permite um melhor desempenho uma vez que o parque de

estacionamento pode injetar mais 44kW aos EVs.

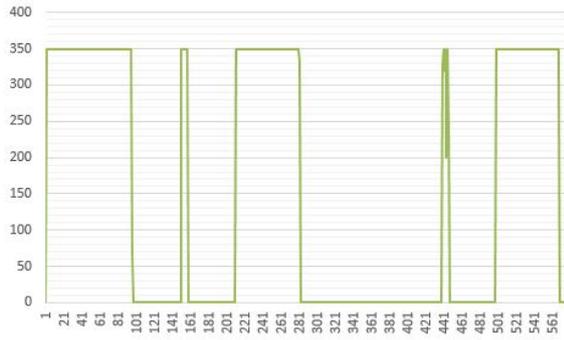


Figura 47: Diagrama de Carga - 1CS-350kW

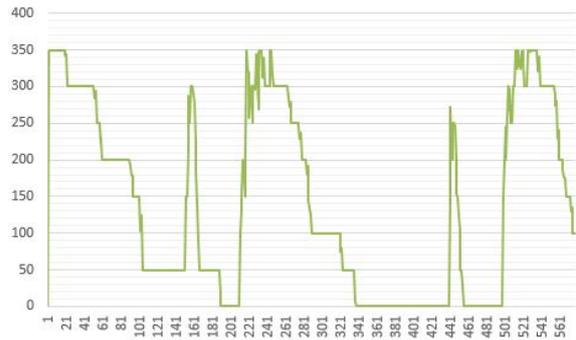


Figura 48: Diagrama de Carga - 7CS-50kW



Figura 49: Diagrama de Carga - 33CS-11kW

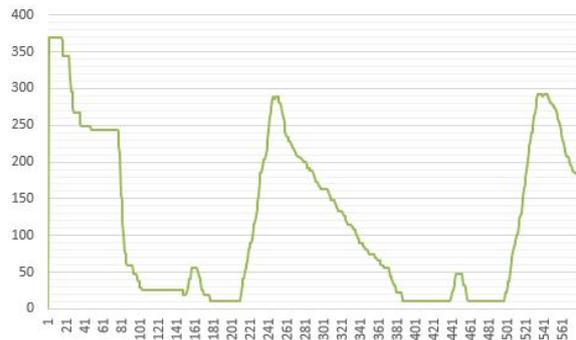


Figura 50: Diagrama de Carga - 100CS-3,7kW



Figura 51: Diagrama de Carga - 17CS-22kW

As Figuras de 52 a 55 mostram os diagramas de carga das Hipóteses 30CS-22kW (Figura 52), 14CS-50kW (Figura 53), 100CS-7,2kW (Figura 54), 33CS-22kW (Figura 55). Para qualquer hipótese observa-se que a arquitetura de carregamento só emprega a potência nos períodos iniciais sendo que nos restantes faz a distribuição com potências menores. Qualquer destas arquiteturas de carregamento apresenta um bom desempenho no carregamento dos EVs uma vez que entregam uma enorme quantidade de energia sempre que necessário.



Figura 52: Diagrama de Carga - 30CS-22kW

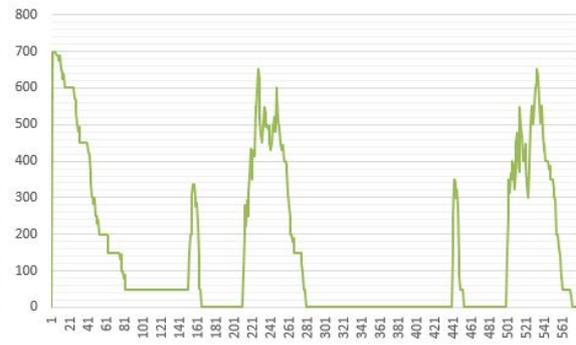


Figura 53: Diagrama de Carga - 14CS-50kW



Figura 54: Diagrama de Carga - 100CS-7,2kW



Figura 55: Diagrama de Carga - 33CS-22kW

A partir da simulação de cada hipótese é possível fazer a desrição gráfica da função objetivo para cada hipótese. A função objetivo apresenta a soma das penalizações feitas aos EVs sendo que o modelo procura minimizar estas penalizações. O desempenho do parque e do modelo que minimiza estas penalizações é dependente do tipo de arquiteturas do parque de estacionamento.

Na Figura 56 é possível observar a progressão temporal da função objetivo para cada hipótese.

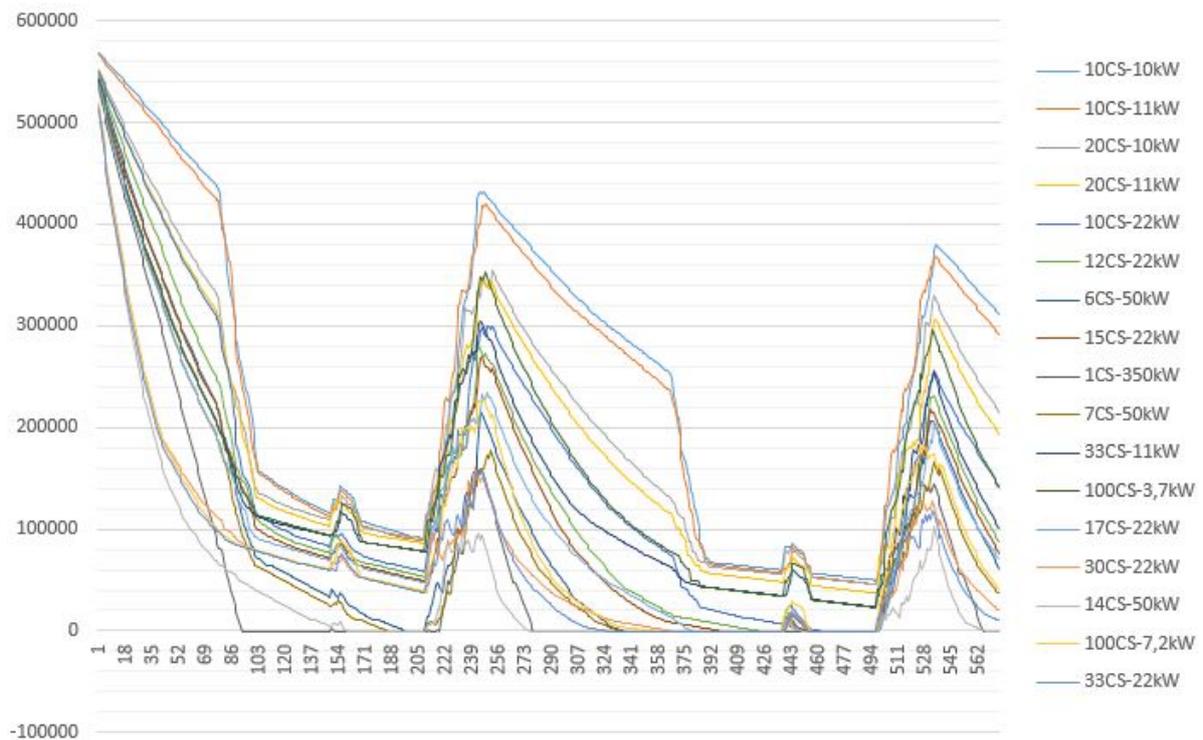


Figura 56: Progressão da Função Objetivo - 100 Lugares e 576 Períodos

A decomposição da Figura 56 por potências permite comparar as diferentes arquiteturas que apresentam desempenhos de carregamento semelhantes. Em primeiro lugar, as hipóteses 10CS-10kW e 10CS-11kW estão apresentadas na Figura em baixo.

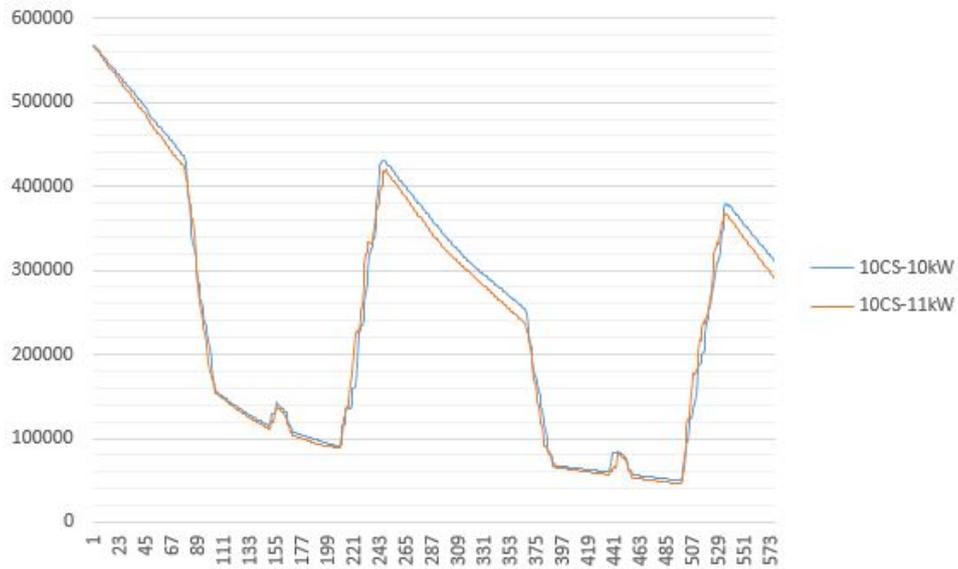


Figura 57: Progressão da Função objetivo - 10CS-10kW e 10CS-11kW

A observação da Figura 57 permite destacar o atraso comentado em cima da hipótese 10CS-10kW em relação à hipótese 10CS-11kW. Apesar desse atraso, a otimização é bastante semelhante reagindo aos mesmo estímulos uma vez que têm o mesmo número de carregadores.

De seguida, a Figura 58 apresenta a progressão da função objetivo para as hipóteses com potência total entre 200kW e 300kW.

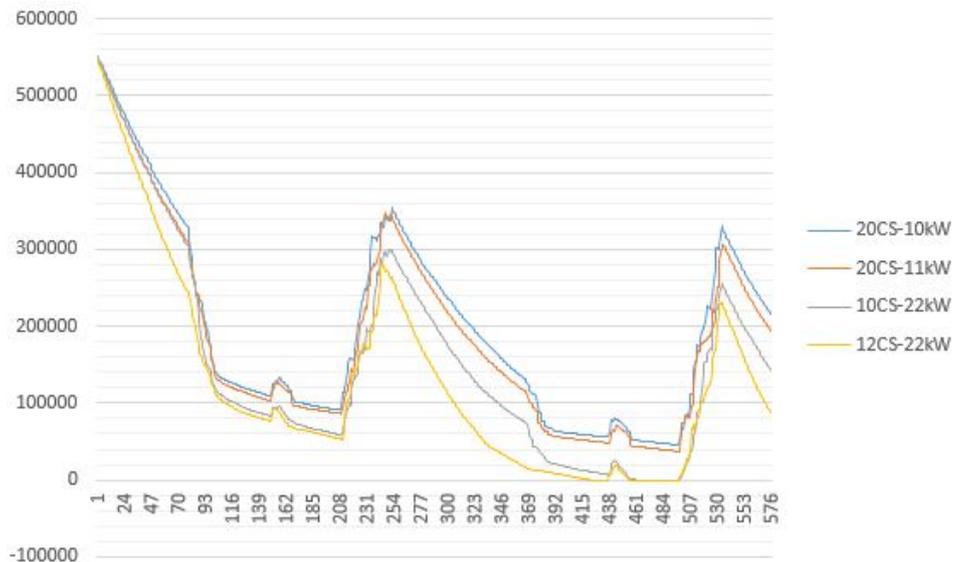


Figura 58: Progressão da Função objetivo - 20CS-10kW, 20CS-11kW, 10CS-22kW e 12CS-22kW

A partir dos dados observados, é possível destacar que ambas as hipóteses com carregadores de 22kW apresentam um melhor desempenho atingindo mesmo valores negativos associados ao carregamento completo de todos os EVs no parque. Tal como no caso anterior, é possível observar diferenças entre as progressões de cada hipótese. Enquanto o atraso da hipótese 20CS-10kW em relação à situação 20CS-11kW diminui, a diferença no número de carregadores e da potência total disponível nas hipóteses com 10 ou 12 carregadores de 22kW salienta

o melhor do segundo uma vez que é possível injetar mais 44kW por período no parque de estacionamento. Na hipótese 12CS-22kW já é possível observar que o modelo proposto é capaz de otimizar a distribuição de energia de modo a antecipar a saída dos EVs. Esta observação deve-se à concavidade apresentada entre os períodos 277 e 438 em que a hipótese anterior mantém um carregamento estável (linearidade da linha da função objetivo) enquanto as restantes hipóteses exibem um ligeiro decréscimo (degrau no gráfico).

A seguinte Figura 59 apresenta a progressão da função objetivo para as hipóteses com potência total entre 300kW e 400kW.

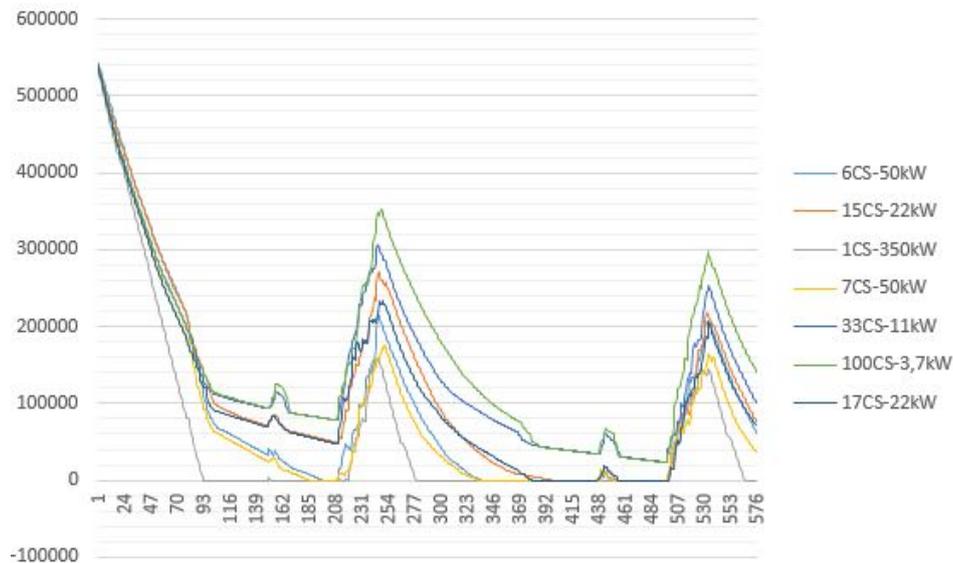


Figura 59: Progressão da Função objetivo - 6CS-50kW, 15CS-22kW, 1CS-350kW, 7CS-50kW, 33CS-11kW, 100CS-3,7kW e 12CS-22kW

A partir da observação da figura retira-se que o melhor desempenho é apresentado pela Hipótese 1CS-350kW. Esta vantagem em relação às restantes hipóteses deve-se a possuir um único carregador centralizado que permite a distribuição da potência tendo em conta apenas um limite. Este limite trata-se do limite da capacidade do carregador e do parque de estacionamento, permitindo assim que o modelo faça a distribuição de energia da sempre através da solução ótima encontrada para cada período.

As hipóteses que apresentam o segundo melhor desempenho deste grupo são 7CS-50kW e 6CS-50kW uma vez que apresentam um desenvolvimento linear durante a simulação.

Em seguida, as hipóteses 15CS-11kW e 17CS-22kW ainda mostram sinais de se adaptarem aos perfis dos EVs embora apresentem desempenho mais do que satisfatório. As últimas duas hipóteses, 33CS-11kW e 100CS-3,7kW apresentam algumas limitações na distribuição da energia ainda que apresentem um serviço de carregamento de qualidade.

As progressões das funções objetivo das restantes hipóteses que dispõem de potências superiores a 600kW estão expostas na Figura 60

A partir da observação dos dados obtidos é possível retirar que qualquer arquitetura de carregamento apresenta um excelente desempenho uma vez que o problema de otimização é resolvido imediatamente. É possível destacar a hipótese 14CS-50kW como a mais rápida a carregar os diferentes EVs no parque de estacionamento e a hipótese 100CS-7,2kW como a mais reativa à entrada e saída de EVs uma vez que as penalizações elevam o valor da função objetivo.

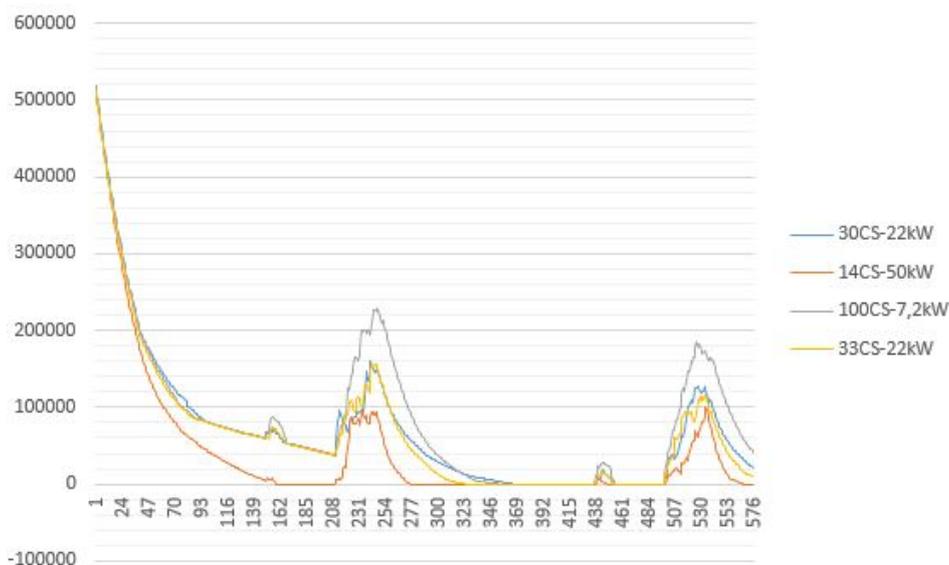


Figura 60: Progressão da Função objetivo - 30CS-22kW, 14CS-50kW, 100CS-7,2kW e 33CS-22kW

Por fim, estudou-se o impacto da presença de utilizadores premium para os seguintes cenários: 15CS-22kW, 1CS-350kW e 17CS-22kW. Para o segundo caso, verificou-se que a presença deste tipo de utilizadores não causa qualquer diferença uma vez que todos os EVs no parque apresentam um estado de SoC completo. Dois cenários foram considerados durante este estudo, o primeiro estuda um cenário em que todos os veículos do modelo Tesla Model 3 são considerados VIP enquanto o segundo simula um parque de estacionamento em que um EV de cada modelo é VIP. O primeiro cenário apresenta um total de 13 veículos VIP com capacidade para 75kWh enquanto o segundo cenário apresenta 11 VIPs com capacidade variável.

Para o cenário 15CS-22kW obteve-se os seguintes valores médios finais do SoC das baterias, Tabela 39.

Tabela 39: Valores Médios Finais da Bateria para cada Grupo e Perfil - 100 Lugares, 576 Períodos e VIPs - 15CS-22kW

Hipóteses	Valor Médio de SoC das Baterias dos EV [%]								
	Leaf	Model 3	Zoe	I3	E300	Ipace	530e	Mini	Outlander
15CS-22kW	96,07	81,47	93,62	85,43	84,93	79,14	100,00	100,00	100,00
15CS-22kW(VIPs)	93,49	82,11	95,66	85,87	87,50	80,60	100,00	100,00	100,00
15CS-22kW(Tesla)	94,06	84,00	90,04	82,37	86,91	80,23	100,00	100,00	100,00

Kauai	Fortwo	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Média VIPs	Média Tesla
87,49	100,00	100,00	89,53	100,00	93,61	90,10	81,47
90,63	100,00	100,00	90,58	100,00	90,73	97,98	-
92,98	100,00	100,00	89,39	100,00	93,92	-	84,00

Da análise da tabela retira-se que os utilizadores premium apresentam um aumento da percentagem da bateria em valores próximos de 8% para o caso (VIPs) enquanto que para o cenário (Tesla) se obtém apenas um crescimento de 2,5%. A observação dos restantes valores indica que ambos os cenários premium apresentam valores de desempenho semelhantes no carregamento dos EVs na sua generalidade em relação ao caso base.

Para o cenário 17CS-22kW obteve-se os seguintes valores médios finais do SoC das baterias, Tabela 40.

Tabela 40: Valores Médios Finais da Bateria para cada Grupo e Perfil - 100 Lugares, 576 Períodos e VIPs - 17CS-22kW

Hipóteses	Valor Médio de SoC das Baterias dos EV [%]								
	Leaf	Model 3	Zoe	I3	E300	Ipace	530e	Mini	Outlander
17CS-22kW	97,76	77,88	100,00	94,43	87,50	77,43	100,00	100,00	100,00
17CS-22kW(VIPs)	100,00	80,14	100,00	94,94	87,50	77,88	100,00	100,00	100,00
17CS-22kW(Tesla)	100,00	80,51	99,17	95,30	87,50	77,88	100,00	100,00	100,00

Kauai	Fortwo	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Média VIPs	Média Tesla
98,28	100,00	100,00	92,11	100,00	95,96	93,85	77,88
100,00	100,00	100,00	93,18	100,00	96,91	98,21	-
100,00	100,00	100,00	93,24	100,00	96,58	-	80,51

Pela observação da tabela em cima, retira-se que ambos os cenários apresentam aumentos inferiores a 5% no valor médio final das baterias dos EVs considerados premium. No entanto, observa-se que uma margem de desempenho superior para ambos os casos em relação ao caso base.

Para ambos os casos observa-se que o modelo proposto não apresenta tanta capacidade para diferenciar os utilizadores premium dos restantes. Isto deve-se ao facto de que, ao longo da simulação, a modelo tende a equilibrar o carregamento entre todos os EVs.

4.4.2 Conclusões - CE3

Nesta secção iremos analisar os resultados para o terceiro Caso de Estudo para o qual se começou por avaliar os efeitos dos valores dos limites dos níveis do parque e das penalizações associadas a estes limites. Por fim, aplicaram-se uma série de arquiteturas de carregamento de modo a avaliar a efetividade do modelo proposto no carregamento dos EVs.

Em relação aos limites dos três níveis do parque de estacionamento, entende-se que os valores de cada limite afeta diretamente os valores da função objetivo na medida em que um maior número de EVs poderão ser agrupados nos níveis inferiores implicando a devida penalização. Adicionalmente, não se observam diferenças relevantes em termos finais de bateria média dos EV quando se variam os limites de cada nível. Assim, pode-se concluir que a escolha deste limites é arbitrária sendo recomendável que atribuir valores que priorizem EVs com maior urgência de carregamento.

Em relação às penalizações, observa-se novamente que os valores de cada penalização têm uma consequência direta no valor da função objetivo. Sendo que o aumento de uma penalização, levará a um aumento na função objetivo. Também se observa que a urgência do carregamento está associada com o peso das penalização de cada EV na medida em que este é comparado com o dos outros EVs. Ao aumentar uma penalização de um nível, está-se a retirar peso relativo a outras penalizações como VIP ou EV com menor valor de bateria. Por fim, a variação das penalizações não apresenta qualquer alteração significativa no valor médio final das baterias de cada grupo.

Assim, pode-se concluir que a variação dos limites ou penalizações não tem um elevado impacto na otimização da energia distribuída pelos carregadores para simulações com durações mais compridas.

A avaliação da efetividade do modelo proposto terá em conta duas vertentes: carregamento dos EVs e investimento total em equipamento técnico. Uma vez que o primeiro está diretamente ligado ao segundo, pretende-se chegar a um compromisso em que se minimiza o segundo enquanto se garante um serviço de qualidade no carregamento dos EVs.

Para compreender o investimento necessário nas instalações e equipamentos de um parque de estacionamento capaz de carregar simultaneamente 100 Evs estudou-se os preços comerciais disponíveis para os carregadores e o Compêndio 2020 da Wolkswagen que categoriza os custos. Este estudo culminou na Tabela 36 que apresenta o investimento total de cada hipótese.

Para avaliar o desempenho de um parque de estacionamento fez-se um estudo que investigou a bateria média final segundo os modelos mais representativos do mercado de veículos elétricos e perfis de utilização (Tabela 37),

a potência média entregue a cada modelo e perfil de utilização (Tabela 38), o diagrama de carga que descreve a potência requerida à rede durante cada período e ainda a progressão do função objetivo, calculada para cada período (Figura 56). Independentemente do cenário, o algoritmo proposto faz uma otimização de modo a distribuir o máximo de energia disponível como se pode verificar pelos diagramas de carga de cada hipótese.

Começando a análise comparativa de hipóteses verifica-se as quatro hipóteses com maior potência disponível (30CS-22kW, 14CS-50kW, 100CS-7,2kW e 33CS-22kW) apresentam um custo bastante elevado. A Hipótese 30CS-22kW apresenta um custo total de 126 000€ devido à instalação de equipamento técnico capaz de carregamentos semi-rápidos. A Hipótese 14CS-50kW necessita de um investimento próximo de 600 000€ para desenvolver a arquitetura estudada. A terceira hipótese, 100CS-7,2kW, custaria um total de 90 000€ para ser desenvolvida devido ao imenso número de carregadores. A última hipótese, 33CS-22kW, apresenta a maior potência total levando a que o investimento seja aproximadamente 140 000€. Por sua vez os EVs apresentam níveis médios finais de bateria mais do que suficientes para o uso normal que estão em concordância com a potência entregue aos EVs, verificando-se um bom desempenho destas arquiteturas de carregamento. Ao estudar o diagrama de carga destas hipóteses (Figuras 52 a 55) observa-se que apenas nos períodos iniciais se entrega a potência total disponível enquanto que nos restantes períodos apenas se usa parte dessa mesma potência. Esta última informação revela que existe um sobredimensionamento das quatro hipóteses em relação ao parque de estacionamento com 100 lugares. Assim, ao averiguar-se que existe um sobredimensionamento das arquiteturas de carregamento e que todas estas hipóteses requerem um elevado poder económico para o seu desenvolvimento, conclui-se que as Hipóteses 30CS-22kW, 14CS-50kW, 100CS-7,2kW e 33CS-22kW não devem ser licenciadas.

As hipóteses 10CS-10kW e 10CS-11kW são as mais conservadoras em termos de investimento. No entanto, a acessibilidade destas hipóteses não garante que o serviço de carregamento seja de qualidade. Esta observação parte da análise da Tabela 37 que mostra que os níveis médios finais de bateria dos grupos são apenas razoáveis. Adicionalmente, a potência entregue revela ser bastante inferior às restantes hipóteses. Uma vez que o serviço de carregamento não garante níveis de bateria capazes ao uso normal dos EVs, conclui-se que não se deve investir em ambas as hipóteses.

Em relação às Hipóteses 20CS-10kW, 20CS-11kW, 10CS-22kW e 12CS-22kW, verifica-se que o investimento necessário para cada arquitetura de carregamento é 38 000€, 43 000€, 42 000€ e 50 400€, respetivamente. Para as hipóteses com vinte carregadores, verifica-se que embora a qualidade de carregamento seja razoável, os valores médios finais da baterias não são suficientes para garantir aos utilizadores que os EVs estarão prontos para o seu uso normal. Assim, ambas as hipóteses são descartadas. Em relação as Hipóteses cujos carregadores têm uma capacidade de 22kW verifica-se o bom funcionamento do carregamento excepto para os EVs que têm maior capacidade. Dado que a capacidade das baterias estão diretamente relacionadas com a autonomia dos EVs e se pretende atingir os valores de autonomia dos automóveis com motores de combustão interna, estas soluções não são sustentáveis a longo prazo. Deste modo, as Hipóteses 10CS-22kW e 12CS-22kW também são descartadas.

Os parques de estacionamento das restantes hipóteses dispõem de potências entre os 300kW e 400kW. Começando análise deste grupo de hipóteses pela que apresenta menor valor de potência total disponível, 6CS-50kW, embora se veja que o carregamento dos EVs ocorre com qualidade assegurada, observa-se um enorme peso económico dado que são precisos 252 000€ para desenvolver esta opção. Em relação à hipótese 15CS-22kW verifica-se que tanto o investimento como o carregamento têm características bastantes interessantes. Através da simulação certifica-se que esta arquitetura garante um bom carregamento para qualquer EV que esteja no parque de estacionamento e, ao mesmo tempo, é a opção mais conservadora em termos de investimentos dos grupo estudado agora tendo um custo total de 63 000€. A Hipótese 1CS-350kW apresenta os melhores resultados entre todas as hipóteses estudadas. No entanto, associado a este carregador DC, existe um elevado investimento económico num total de 102 000€. Tal como no caso 6CS-50kW, a hipótese 7CS-50kW não é altamente recomendável por depender de 294 000€ embora garanta um serviço de carregamento de qualidade. A hipótese correspondente a uma tomada doméstica por cada lugar tem um custo total de 30 000€, o terceiro mais acessível entre todas as hipóteses. No entanto, a hipótese 100CS-3,7kW não é capaz de garantir um carregamento competente para os EVs com maiores capacidade pelo que deve ser descartado. A hipótese 17CS-22kW apresenta um custo superior à hipótese 15CS-22kW, no entanto não obtém resultados melhores no carregamento dos EVs estacionados. A última hipótese a ser estudada é 33CS-11kW que apresenta dificuldades em garantir a qualidade do carregamento dos EVs com maiores autonomias e o seu investimento total aproximadamente 71 000€.

Deste modo, de acordo com a metodologia de gestão e distribuição de potência proposta, as Hipóteses recomendadas à construção e instalação na adoção em larga escala de EVs são: 15CS-22kW, 1CS-350kW, 17CS-22kW porque garantem o bom carregamento dos EVs minizando o esforço económico associado à aplicação destes cenários.

A existência de diferentes perfis de utilização dos EVs fazem sobressair um padrão no diagrama de carga das hipóteses. Comparando os desempenhos de cada hipóteses, retira-se que as arquiteturas com maior valor de potência disponível são mais capazes de reduzir o peso imediato da entrada de vários veículos em pequenos intervalos de períodos.

Em seguida, estudou-se a possibilidade de existirem veículos VIP nestes parques recomendados. Não se terá em consideração a hipótese 1CS-350kW uma vez que apresenta um carregamento completo para qualquer EV no seu parque de estacionamento. Deste estudo, retira-se que, em primeiro lugar, a opção premium apresenta uma menor importância para um parque destas dimensões porque, em média, apresentam apenas aumentos inferiores a 10% da bateria dos EVs. Em segundo lugar, as arquiteturas centralizadas apresentam novamente melhores desempenhos. Neste caso, a hipótese 15CS-22kW apresenta ganhos até 8% da bateria dos EVs enquanto que a hipótese 17CS-22kW apresenta aumentos inferiores a 5% ainda que tenha mais 2 carregadores com potência de 22kW.

Por fim, identifica-se que o modelo é capaz de otimizar o carregamento dos EVs nos parques de estacionamento independentemente da arquitetura excepto no caso de apenas existirem carregadores individuais. Nesses casos, devido à sua simplicidade, não há possibilidade de ocorrer otimização da distribuição de energia pelos EVs. À medida que a simulação decorre, a complexidade do problema vai diminuído, logo o método proposto converge para o mesmo ponto (carregamento completo de todos os EVs estacionados) independentemente da arquitetura de carregamento ainda que a otimização seja mais veloz para hipóteses com carregadores centralizados. Nos restantes casos, observa-se que o modelo utiliza toda a potência disponível sempre que possível, é capaz de reagir às entradas e saídas dos vários EVs redistribuindo a potência injetada ainda que não consiga prever os períodos em que se dão alterações no parque de estacionamento. Também é possível deduzir que quanto maior for a potência dimensionada no parque de estacionamento e maior for a capacidade dos carregadores, mais rápida será encontrada a solução por parte do modelo uma vez que não existem limitações técnicas tão restritas.

5 Conclusões e Trabalho Futuro

A crescente preocupação com as alterações climáticas tem motivado o desenvolvimento de soluções capazes de atenuar as emissões de gases de efeito estufa. O investimento na adoção de veículos elétricos tem vindo a ser uma das soluções com mais potencial por todo o mundo para corrigir as elevadas concentrações de dióxido de carbono, CO₂.

Por sua vez, a adoção massiva de veículos elétricos está a alterar o paradigma mundial da mobilidade. No entanto, existem barreiras ao desenvolvimento deste tipo de tecnologia como o carregamento dos EVs. Dado que os veículos elétricos estão estacionados 90% do tempo, os parques de estacionamento, que são alimentados pelas redes elétricas, as quais têm limitações técnicas, devem-se adaptar a esta nova realidade.

Esta dissertação contribui para o estado da arte através do desenvolvimento de uma metodologia baseada em técnicas determinísticas para resolver o problema do carregamento dos veículos elétricos em parques de estacionamento. Mais exactamente, foi proposto um modelo de programação inteira mista para resolver o problema de otimização e controlo do sistema de carregamento de veículos elétricos. A formulação matemática para o problema de carregamento de veículos elétricos apresentado nesta dissertação está exposto na secção 3. O sistema global proposto engloba diferentes equipamentos técnicos como parques de estacionamento, carregadores e veículos elétricos. Adicionalmente, a rede de distribuição simulada não é objeto de controlo pelo que apenas existe uma fonte de energia externa.

Esta dissertação também contribui para minimizar o impacto da integração do carregamento de veículos elétricos na rede elétrica na medida em que desenvolve diferentes arquiteturas de carregamento que apresentem bons desempenhos na entrega de energia e minimizam o investimento necessário. Complementariamente, o modelo considera os limites de potência entregues pela rede em cada período de tempo, permitindo ajustar o consumo do parque em função da disponibilidade da rede elétrica se assim for necessário.

Os três casos de estudo criados para testar e validar o desempenho da metodologia proposta são descritos na secção 4. Para todos os casos, foi aplicado um problema de otimização inteira mista com o propósito de minimizar a Função Objetivo. No primeiro caso de estudo, pretendeu-se comparar o desempenho de carregadores centralizados e carregadores individuais tendo-se verificado que os carregadores centralizados apresentam um melhor desempenho. Neste caso, observa-se também que o método proposto apresenta bons desempenhos na otimização da distribuição da energia disponível porque aproveita a máxima capacidade do parque de estacionamento sempre que possível. Pelo contrário, a otimização está sempre limitada pelos carregadores utilizados uma vez que podem criar limitações técnicas devido à sua capacidade.

No segundo caso de estudo, estudou-se a possibilidade de existirem utilizadores com contratos 'premium' que investem num melhor serviço de carregamento tendo-se concluído que os carregadores centralizados garantem uma melhor distribuição da potência de carregamento, permitindo a existência deste tipo de utilizadores. Para este caso de estudo observa-se também que o método aplicado garante melhores resultados quando os EVs estão estacionados durante curtos períodos de tempo, sendo o impacto atenuado quando estes estão estacionados por longos períodos.

No último caso de estudo, são propostos diferentes cenários de carregamento para testar e validar o método proposto tendo-se recomendado as arquiteturas que combinam um bom desempenho com um menor investimento. Numa primeira análise, entende-se que o modelo de otimização tende a equilibrar o carregamentos entre os diferentes EVs para longos períodos de simulação. Depois, o desempenho do carregamento é influenciado pelos carregadores disponíveis embora se obtenha sempre uma solução para o problema de otimização. Deste modo, arquiteturas com carregadores centralizados permitem um maior grau de liberdade na distribuição da energia disponível que, por sua vez, permite um melhor desempenho no carregamento dos EVs. Adicionalmente, verifica-se que a opção para utilizadores premium perde relevância para intervalos de períodos de longa duração.

Através das simulações realizadas e dos dados obtidos, conclui-se que modelo de otimização e controlo do sistema de carregamento dos parques de estacionamento foi bem sucedido uma vez que permite uma boa distribuição da energia disponível no parque, de modo a garantir um bom carregamento para todos os EVs consoante as limitações técnicas.

5.1 Trabalho Futuro

Como trabalho futuro, existem uma série de possibilidades por onde se pode continuar o estudo da gestão de carregamento em parques de estacionamento. Em primeiro lugar, seria benéfico completar o investimento económico através de um estudo aprofundado do custos associados à contratação da potência à rede e eventuais alterações na rede.

Por outro lado, estudar uma hipótese em que o modelo já conhece ou prevê os períodos em que os veículos elétricos deixam o parque de estacionamento para verificar que adaptações poderiam ser feitas para permitir o melhor carregamento dos veículos. Isto implica que a comunicação V2G aumente e que seja prévia ao estacionamento.

A partir do mesmo princípio, pode-se estudar a possibilidade de os EVs venderem energia à rede durante os períodos de pico. Este modelo implicaria o desenvolvimento de uma rede inteligente e o estudo adicional das tarifas de eletricidade.

A partir de outra perspectiva, também se poderia estudar a integração de fontes de energia renováveis para o carregamento dos EVs.

Referências

- [1] Hannah Ritchie. Energy. *Our World in Data*, 2014. <https://ourworldindata.org/energy>.
- [2] European Environment Agency. Final energy consumption by sector and fuel (ener 016). Technical report.
- [3] European Environment Agency. Final energy consumption by mode of transport. Technical report.
- [4] Ghg emissions by sector in the eu-28, 1990-2016. Technical report, European Environment Agency.
- [5] Greenhouse gas emissions from transport in europe. Technical report, European Environment Agency.
- [6] Ministério do Ambiente e Transição Energética. *Roadmap to Carbon Neutrality 2050 - Long Term Strategy*. 2019.
- [7] Carros elétricos: apoios à compra e condições. *DECO Proteste*.
- [8] Amsterdam Roundtables Foundation e Mckenzie Company The Netherlands. Electric vehicles in europe: gearing up for a new phase? Technical report, April 2014.
- [9] Henry Lee e Alex Clark. Charging the future: Challenges and opportunities for electric vehicles adoption. Technical report, Harvard Kennedy School, September 2018.
- [10] Sina Balzhauser. Ev and ev charger incentives in europe: A complete guide for businesses and individuals. 4 December 2019 (Updated on: 3 August 2020).
- [11] D. Wu, D. C. Aliprantis, and L. Ying. Load scheduling and dispatch for aggregators of plug-in electric vehicles. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1):368–376, 2012.
- [12] S. Rahman and G. B. Shrestha. An investigation into the impact of electric vehicle load on the electric utility distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8(2):591–597, 1993.
- [13] G. T. Heydt. The impact of electric vehicle deployment on load management strategies. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-102(5):1253–1259, 1983.
- [14] Robert C. Green, Lingfeng Wang, and Mansoor Alam. The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1):544 – 553, 2011.
- [15] H. Cui, F. Li, X. Fang, and R. Long. Distribution network reconfiguration with aggregated electric vehicle charging strategy. In *2015 IEEE Power Energy Society General Meeting*, pages 1–5, 2015.
- [16] Steffen Limmer. Dynamic pricing for electric vehicle charging—a literature review. *Energies*, 12(18), 2019.
- [17] Samy Faddel, Ali Al-Awami, and Osama Mohammed. Charge control and operation of electric vehicles in power grids: A review. *Energies*, 11:701, 03 2018.
- [18] Sevket Gökay, Christoph Terwelp, Christian Samsel, Bastian Greber, Karl-Heinz Krempels, and Sebastian Rabenhorst. Parking lot management for charging stations. 04 2014.
- [19] Jia Ying Yong, Vigna K. Ramachandaramurthy, Kang Miao 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*, 49:365 – 385, 2015.
- [20] S. Sterkenburg, E. Rietveld, F. Rieck, Bram Veenhuizen, and Hans Bosma. Analysis of regenerative braking efficiency — a case study of two electric vehicles operating in the rotterdam area. pages 1–6, 09 2011.
- [21] C Iclodean, B Varga, N Burnete, D Cimerdean, and B Jurchiș. Comparison of different battery types for electric vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 252:012058, oct 2017.
- [22] Stephanie Flamberg e Susan Rose e Denny Stephens. Analysis of published hydrogen vehicle safety research. Technical report, Battelle Memorial Institute, February 2010.
- [23] Max Åhman. Primary energy efficiency of alternative powertrains in vehicles. *Energy*, 26(11):973 – 989, 2001.
- [24] JongRoul Woo, Hyunhong Choi, and Joongha Ahn. Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions for electric vehicles based on electricity generation mix: A global perspective. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51:340 – 350, 2017.

- [25] Petra Zsuzsa Lévy, Yannis Drossinos, and Christian Thiel. The effect of fiscal incentives on market penetration of electric vehicles: A pairwise comparison of total cost of ownership. *Energy Policy*, 105:524 – 533, 2017.
- [26] Dr. Jamie Hamilton Geneviève Alberts Saskia Fullerton-Smith Edward Day Michael Woodward, Dr. Bryn Walton and James Ringrow. Electric vehicles: setting a course for 2030. *Deloitte Insights*, July 2020.
- [27] Rebecca Linke. The real barriers to electric vehicle adoption.
- [28] Marina Nascimento. Associação de utilizadores de veículos elétricos.
- [29] 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)*, pages 1–10, 2013.
- [30] Stewart A. Birrell, Daniel Wilson, Chek Pin Yang, Gunwant Dhadyalla, and Paul Jennings. How driver behaviour and parking alignment affects inductive charging systems for electric vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58:721 – 731, 2015. Technologies to support green driving.
- [31] EMEL. epark.
- [32] Masoud Honarmand, Alireza Zakariazadeh, and Shahram Jadid. Self-scheduling of electric vehicles in an intelligent parking lot using stochastic optimization. *Journal of the Franklin Institute*, 352(2):449 – 467, 2015. Special Issue on Control and Estimation of Electrified vehicles.
- [33] Electric charging for fleets.
- [34] S. Lee, D. Yoon, and A. Ghosh. Intelligent parking lot application using wireless sensor networks. In *2008 International Symposium on Collaborative Technologies and Systems*, pages 48–57, 2008.
- [35] Masoud Honarmand, Alireza Zakariazadeh, and Shahram Jadid. Integrated scheduling of renewable generation and electric vehicles parking lot in a smart microgrid. *Energy Conversion and Management*, 86:745 – 755, 2014.