



**Daniel Viana Dias**

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**Estudo sobre a flexibilidade energética  
em edifícios disponibilizada por veículos  
elétricos**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Rui Amaral Lopes, Professor Auxiliar Convidado,  
Universidade NOVA de Lisboa

Co-Orientador: João Francisco Alves Martins, Professor Associado,  
Universidade NOVA de Lisboa

**Setembro, 2019**



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA



**Estudo sobre a flexibilidade energética em edifícios disponibilizada por veículos elétricos**

Copyright © Daniel Viana Dias, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



“Porque dele, e por ele, e para ele, são todas as coisas;  
glória, pois, a ele eternamente. Amém.”

Romanos 11:36



## Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores Professor Rui Amaral Lopes e Professor João Martins pelo apoio, orientação, partilha de conhecimento e extrema paciência que tiveram para comigo. Também agradeço à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa por todo o apoio institucional prestado ao longo de todo o meu período académico. Quero agradecer ao Professor Mário Ventim Neves pelo exemplo prestado que levarei como inspiração para o resto da minha vida profissional e todas as oportunidades que me proporcionou ao longo do curso.

Gostaria também de agradecer ao NEEC e aos membros da sua direção que me apoiaram durante os últimos dois anos e que contribuíram para ser a pessoa que sou hoje. À CoPe de MIEEC que me ajudou a ultrapassar barreiras importantes, barreiras essas que impediriam a conclusão do curso.

Reconheço também o apoio de inúmeros colegas, em especial Pedro Rio, Francisco Carrola, Francisco Nunes, Nelson Barreira, Diogo Figueiredo, Bruno Monteiro e João Mouco que durante os últimos 5 anos sempre me acompanharam e ajudaram em inúmeras situações e os quais tornaram-se amigos que levarei para a vida.

Gostaria de expressar a minha eterna gratidão à minha família e em especial meus pais pelo amor, exemplo de trabalho árduo e todos os seus esforços que permitiram-me alcançar a melhor educação.

Agradeço em especial à minha noiva Débora que incondicionalmente apoiou-me e cujo amor foi a fonte de toda a minha resiliência e motivação. Espero poder recompensar-te ao longo da nossa vida.

Acima de tudo agradeço a Deus.



## Resumo

A introdução em larga escala de veículos elétricos apresenta-se como um desafio para a gestão das redes de distribuição de energia elétrica. Estes veículos diferem dos veículos convencionais sobretudo pela necessidade de carregamento. Atendendo ao conforto dos utilizadores, estes carregamentos podem ser controlados e assim disponibilizar flexibilidade energética. A literatura mostra que esta flexibilidade energética pode ser explorada para alcançar diferentes objetivos (e.g. redução de custos para o utilizador).

Neste contexto, o trabalho descrito nesta dissertação apresenta três principais objetivos. O primeiro diz respeito ao desenvolvimento de uma metodologia que permite estudar os impactos gerados pelo carregamento descoordenado de veículos elétricos em edifícios. O segundo objetivo refere-se ao desenvolvimento de uma metodologia de gestão de carregamentos que permite explorar a flexibilidade energética disponibilizada pelos veículos e controlar o seu carregamento de modo a otimizar uma função objetivo. O terceiro objetivo foca a aplicação das duas metodologias anteriormente referidas a um caso de estudo assente em dados reais que permite avaliar os impactos introduzidos pelo carregamento de veículos elétricos num edifício e estudar os benefícios resultantes da exploração da flexibilidade energética existente. Os resultados obtidos mostram que a utilização da referida flexibilidade pode reduzir os custos associadas à potência contratada.

Palavras-chave: Veículos Elétricos, Flexibilidade Energética, Gestão de Energia, *Demand Side Management*.



## Abstract

The large-scale integration of electric vehicles presents a challenge for the management of electricity distribution grids. These vehicles differ from conventional vehicles mainly in the need of charging. Considering user comfort, these chargers can be controlled and thus provide energy flexibility. The literature shows that this energy flexibility can be exploited to achieve different objectives (e.g. reducing costs for the user).

In this context, the work described in this dissertation has three main objectives. The first concerns the development of a methodology that allows the study of the impacts generated by the uncoordinated charging of electric vehicles in buildings. The second objective refers to the development of a charging management methodology that allows to explore the energy flexibility provided by vehicles and to control their charging in order to optimize an objective function. The third objective focuses the application of the two methodologies mentioned above to a case study based on real data that allows to evaluate the impacts introduced by the charging of electric vehicles in a building and to study the benefits resulting from the exploitation of existing energy flexibility. The results show that the use of such flexibility can reduce the costs associated with the contracted power.

Keywords: Electric Vehicles, Energy Flexibility, Energy Management, Demand Side Management.



## Conteúdos

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introdução .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 <i>Enquadramento e Motivação .....</i>                             | <i>1</i>  |
| 1.2 <i>Objetivos .....</i>   | <i>3</i>  |
| 1.3 <i>Estrutura do Documento .....</i>                                | <i>4</i>  |
| <b>2. Trabalhos Relacionados .....</b>                                 | <b>5</b>  |
| 2.1 <i>Caracterização da Flexibilidade Energética .....</i>            | <i>5</i>  |
| 2.2 <i>Gestão do consumo de energia .....</i>                          | <i>9</i>  |
| 2.3 <i>Utilização de Veículos Elétricos.....</i>                       | <i>12</i> |
| 2.3.1 <i>Veículos Elétricos .....</i>                                  | <i>12</i> |
| 2.3.2 <i>Estratégias de gestão utilizando veículos elétricos .....</i> | <i>17</i> |
| 2.4 <i>Discussão.....</i>  | <i>27</i> |
| <b>3. Metodologia .....</b>  | <b>29</b> |
| 3.1 <i>Avaliação de Impactos .....</i>                                 | <i>29</i> |
| 3.2 <i>Gestão de Carregamentos.....</i>                                | <i>32</i> |
| 3.2.1 <i>Gestão Singular .....</i>                                     | <i>32</i> |
| 3.2.2 <i>Gestão de Carregamento Múltipla.....</i>                      | <i>34</i> |
| <b>4. Resultados .....</b>   | <b>39</b> |
| 4.1 <i>Caso de Estudo.....</i>   | <i>39</i> |
| 4.1.1 <i>Carga do Edifício .....</i>                                   | <i>39</i> |
| 4.1.2 <i>Distâncias Percorridas .....</i>                              | <i>40</i> |
| 4.1.3 <i>Entradas no Parque .....</i>                                  | <i>42</i> |
| 4.1.4 <i>Características dos Veículos.....</i>                         | <i>44</i> |
| 4.2 <i>Avaliação de Impactos .....</i>                                 | <i>45</i> |
| 4.3 <i>Gestão de Carregamentos.....</i>                                | <i>47</i> |
| <b>5. Considerações Finais.....</b>                                    | <b>55</b> |
| 5.1 <i>Revisão Geral.....</i>  | <i>55</i> |
| 5.2 <i>Contribuições Originais .....</i>                               | <i>55</i> |
| 5.3 <i>Trabalhos Futuros .....</i>                                     | <i>56</i> |
| <b>Bibliografia.....</b>   | <b>59</b> |



## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Fig. 2.1 – Caracterização da flexibilidade como função dinâmica em [16].   | 6  |
| Fig. 2.2 – Representação conceptual da metodologia utilizada para quantificar a flexibilidade energética de [17] em [18]. (a) Flexibilidade utilizada para aumentar o consumo instantâneo. (b) Flexibilidade utilizada para reduzir o consumo instantâneo. | 6  |
| Fig. 2.3 – Eficiência do aumento do consumo representada pela mudança no consumo de energia $\Delta P$ versus o uso adicional de energia durante o período de teste por estação, [19] em [15].   | 7  |
| Fig. 2.4 – Perfil da flexibilidade da operação atrasada(esquerda) e forçada (direita) [20]   | 8  |
| Fig. 2.5 – Comparação da curva de custo para utilização da flexibilidade. a) curva de custo singular. b) curva de custo ao longo do tempo. [22] em [18].   | 9  |
| Fig. 2.6 – Objetivos dos métodos de Demand Side Management [27].   | 10 |
| Fig. 2.7 – Arquiteturas de EVs, PHEV série-paralelo, (b) PHEV série, (c) PHEV paralelo, (d) BEV, adaptada de [42].   | 15 |
| Fig. 2.8 – Diagrama de blocos de uma estratégia de DSM em casas inteligentes [51].   | 21 |
| Fig. 2.9 – Sistema multiagente descrito em [52].   | 22 |
| Fig. 2.10 – Estrutura hierárquica de três níveis para carregamento coordenado [24].  | 24 |
| Fig. 3.1 – Diagrama de Blocos para Avaliação de Impactos do Carregamento.  | 30 |
| Fig. 3.2 – Comparação entre o diagrama de carga não otimizado(esquerda) e otimizado(direita) de um veículo.  | 33 |
| Fig. 3.3 – Fluxograma da Função de Otimização singular.  | 34 |
| Fig. 3.4 – Diagramas de Carga do edifício(esquerda) e dos EVs não otimizados(direita).   | 36 |
| Fig. 3.5 – Diagramas de carga total não otimizado (esquerda) e de combinações de horários de carregamento (direita).   | 36 |
| Fig. 3.6 – Comparação entre três combinações de horário (esquerda) e entre o cenário base e o otimizado (direita).   | 36 |
| Fig. 4.1 – Edifício do DEEC da FCT-NOVA  | 40 |
| Fig. 4.2 – Diagrama de Carga Semanal do edifício   | 40 |
| Fig. 4.3 – Comparação entre a probabilidade da amostra original e da gerada.   | 42 |
| Fig. 4.4 – Portaria principal da FCT-NOVA com as cancelas automáticas [64].  | 43 |
| Fig. 4.5 – Mapa com o parque de estacionamento (azul) e o DEEC (vermelho) realçados [65].  | 43 |
| Fig. 4.6 – Diagrama de ocupação do parque considerado com estadias variáveis de 4,8 e 12 horas.  | 44 |

|   |    |
|---|----|
| Fig. 4.7 – Potência de pico e consumo de energia total para diferentes potências de carregamento e níveis de penetração de EVs.....                             | 45 |
| Fig. 4.8 – Diagrama de carga do edifício e do carregamento dos EVs com uma potência de carregamento de 22 kW quando todos os veículos são elétricos. ....       | 46 |
| Fig. 4.9 – Comparação entre os diagramas de carga sem gestão e com gestão singular e múltipla com 7,4 kW de potência de carregamento e 8 horas de estadia. .... | 47 |
| Fig. 4.10 – Comparação das durações das simulações entre a estratégia singular e a múltipla. ....   | 48 |
| Fig. 4.11 – Comparação da potência de pico entre cenários com e sem gestão com estadia de 12 horas. ....  | 51 |
| Fig. 4.12 – Comparação da potência de pico entre cenários com e sem gestão com estadia de 8 horas. ....   | 51 |
| Fig. 4.13 – Comparação da potência de pico entre cenários com e sem gestão com estadia de 4 horas. ....   | 52 |
| Fig. 4.14 – Perfil da flexibilidade energética utilizada de um veículo. ....  | 53 |
| Fig. 4.15 – Perfis da flexibilidade energética agregada utilizada com 8 e 12 horas de estadia..   | 53 |

## Lista de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Modos de carregamento de EVs segundo a norma IEC 61851 .....  | 16 |
| Tabela 2 – Distâncias diárias consideradas a partir de [63].....   | 41 |
| Tabela 3 – Modelos de veículos considerados no caso de estudo. ....  | 44 |
| Tabela 4 - Custo por dia da potência contratada para cenários base e com gestão singular de carregamentos, considerando 4 horas de estadia (valores em €). ....  | 49 |
| Tabela 5 - Custo por dia da potência contratada para cenários base e com gestão singular de carregamentos, considerando 8 horas de estadia (valores em €). ....  | 50 |
| Tabela 6 - Custo por dia da potência contratada para cenários base e com gestão singular de carregamentos, considerando 12 horas de estadia (valores em €). .... | 50 |



## Nomenclatura

|                      |   |
|----------------------|---|
| $\%_{pen}$           | Porcentagem de penetração de veículos elétricos                     |
| $C_{Total}$          | Consumo total   |
| $Calcular_{Carga}$   | Processo para calcular o diagrama de carga dos Evs                  |
| $Carga_{total}$      | Diagrama de carga do edifício associado aos carregamentos           |
| $Dados_{Mobilidade}$ | Vetor com dados de distâncias percorridas                           |
| $\Delta P$           | Potencial de deslocamento de energia                                |
| $Distância_{EV}$     | Processo de determinação de distâncias percorridas                  |
| $EDC$                | Estado de Carga   |
| $Ent_{EV}$           | Vetor com os horarios de entrada de veículos elétricos              |
| $Ent_{Parque}$       | Vetor com todos os horarios de entrada de veículos                  |
| $EV_{Bat}$           | Capacidade máxima da bateria  |
| $EV_{Carga}$         | Diagrama de carga do EV   |
| $EV_{Cons}$          | Consumo energético por quilómetro                                   |
| $EV_{Dist}$          | Vetor com as distâncias percorridas pelos veículos elétricos        |
| $EV_{Entradas}$      | Processo de determinação de entradas elétricas                      |
| $EV_{Gerados}$       | Vetor de estruturas que representam os veículos elétricos           |
| $Extrair_{Features}$ | Processo para extrair indicadores                                   |
| $Gerar_{EV}$         | Processo para gerar as estruturas que definem os veículos elétricos |
| $Modelos_{EV}$       | Vetor com as características dos veículos elétricos                 |
| $n$                  | Número de veículos elétricos  |
| $P_a$                | Possíveis potências de carregamento                                 |
| $P_c$                | Potência de Carregamento  |
| $P_{dec}$            | Diminuição de potência  |
| $P_{inc}$            | Aumento de potência   |
| $P_{máx}$            | Potência de pico  |
| $P_{méd}$            | Potência média  |
| $Parque_{EV}$        | Lista de veículos elétricos disponíveis                             |
| $PTA$                | Peak-to-average ratio   |
| $T$                  | Período de teste  |
| $t_c$                | Duração do carregamento   |
| $t_i$                | Tempo de chegada  |
| $t_l$                | Atraso máximo para início do carregamento                           |
| $t_L$                | Vetor com os valores de atraso máximo de todos os Evs               |
| $t_o$                | Tempo de partida  |
| $t_\tau$             | Tempo ideal de início de carregamento                               |

$t_s$

Atraso para início de carregamento

## Abreviaturas

|          |   |
|----------|---|
| ANFIS    | <i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System</i>                      |
| ASM      | <i>Aggregator Scheduling Method</i>                               |
| BEV      | Veículos Elétricos de Bateria                                     |
| CHP      | Sistema combinado de calor e energia                              |
| DEEC     | Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores       |
| DR       | <i>Demand Response</i>  |
| DSM      | <i>Demand Side Management</i>                                     |
| DSO      | Operador do sistema de distribuição                               |
| EV       | Veículos Elétricos  |
| FCEV     | Veículo de célula de combustível                                  |
| FCT-NOVA | Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa |
| GEE      | Gases de Efeito Estufa  |
| HEM      | Gerenciador de energia residencial                                |
| HEV      | Veículo elétrico híbrido  |
| IEC      | Comissão Eletrotécnica Internacional                              |
| IEEE     | Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrónicos             |
| JSM      | <i>Joint Scheduled Method</i>                                     |
| PEV      | Veículos Elétricos plug-in  |
| PHEV     | Veículos Elétricos Híbridos plug-in                               |
| PLIM     | Programação linear inteira mista                                  |
| PV       | Painel Fotovoltaico   |
| REEV     | Veículo elétrico de alcance estendido                             |
| TES      | Armazenamento de energia térmica                                  |
| UE       | União Europeia  |
| V2G      | <i>Vehicle to Grid</i>  |
| WFA      | <i>Water Filling Algorithm</i>                                    |

# 1. Introdução

As alterações climáticas são uma das maiores ameaças do sec. XXI com consequências em todas as áreas da sociedade. Com o objetivo de unir o mundo e reduzir esta problemática muitas convenções e acordos têm sido realizados, como por exemplo a Convenção Quadro das Alterações Climáticas onde se desenvolveu o Acordo de Paris, que entrou em vigor em novembro de 2016 [1]. Devido a estas convenções e acordos, entre outros fatores, os sistemas de energia têm sofrido grandes alterações. Grande parte destas alterações são causadas pelos avanços nas tecnologias associadas às fontes de energias renováveis, principalmente solar e eólica. Estes avanços apresentam resultados positivos no aumento da capacidade de geração de energia de fontes renováveis relativamente aos combustíveis fósseis [1].

Embora esta transição energética seja atualmente uma realidade, ainda existe muito espaço para progresso. A descarbonização dos sistemas energéticos é uma das prioridades da política energética dos governos europeus [2]. Assim já existem algumas alterações a níveis de interesses e estratégias desenvolvidas pela comissão europeia que vêm contribuir para alcançar este objetivo [2][3]. Uma dessas alterações passa pela introdução de veículos elétricos (EVs) e veículos elétricos híbridos (PHEV) como substitutos dos veículos convencionais de combustão interna.

Apesar das vantagens associadas a esta transição, surgem também grandes preocupações, já que os sistemas de conversão de energia baseados em fontes renováveis podem apresentar perfis de geração mais imprevisíveis, quando comparados com as centrais existentes suportadas por combustíveis fósseis. Já do lado da procura, os carregamentos de EVs e PHEV podem aumentar a pressão na rede devido às elevadas exigências e horários de carregamentos simultâneos [4].

Neste contexto, a aplicação de métodos de *Demand Response* (DR) apresenta-se como parte integrante para reduzir possíveis impactos negativos originados pelas mudanças introduzidas tanto no lado a produção como no lado da procura dos referidos sistemas. Para tal, e com especial ênfase nos impactos introduzidos pelos carregamentos de EVs e PHEVs, a flexibilidade energética oferecida pelo carregamento destes veículos deverá ser utilizada.

## 1.1 Enquadramento e Motivação

Nos últimos anos, a relevância dos veículos elétricos tem crescido significativamente, sendo que em 2016, 2017 e 2018 o número global de veículo cresceu em 62%, 62% e 64% respectivamente [5]. É esperado que este número aumente nos próximos anos como resultado dos incentivos

previstos pela UE neste setor [6]. Para além desses incentivos, a crescente consciencialização da população relativamente às alterações climáticas contribui para a maior aderência aos BEV, uma vez que estes são associados a menores emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo do seu ciclo de vida, comparativamente a veículos convencionais de combustíveis fósseis [7].

Estudos mostram que, embora as emissões de GEE sejam variáveis, os valores medidos nas fases de montagem do ciclo de vida dos EVs são superiores aos registados nas fases de montagem de veículos convencionais movidos a combustíveis fósseis durante a cadeia de produção dos veículos e seus componentes. As emissões totais podem ser inferiores uma vez que esses veículos não emitem GEE durante as suas viagens, mas as emissões associadas ao seu carregamento dependem do *mix* de produção do país. Estas emissões podem ser reduzidas ainda mais com os avanços na fabricação de baterias, na reciclagem das mesmas e na descarbonização das redes elétricas [8].

O processo de descarbonização das redes é importante na medida que em redes de baixo carbono, isto é, redes onde a produção de energia provém sobretudo de fontes com baixas emissões de CO<sub>2</sub>, as emissões de um EV podem ser 90% inferiores à média dos veículos movidos a combustíveis fósseis. Atualmente, para o consumo médio de energia elétrica da UE, as emissões do ciclo de vida de um EV são 50% mais baixas do que as dos veículos convencionais [9].

A utilização de veículos elétricos tem associadas a si diversas vantagens ambientais, sendo uma delas o conforto em áreas urbanas, por contribuir para minimizar a poluição acústica. Este efeito é mais notório quando os EVs representam uma larga porção da frota de veículos e quando esses veículos circulam em áreas de tráfego denso e estacionário ou onde o limite de velocidade é baixo, já que os níveis de ruído dos veículos dependem da sua velocidade [10].

Outra vantagem ambiental relaciona-se com a melhor qualidade do ar, especialmente quando medidas as emissões de NO<sub>2</sub> e CO [11]. Esta melhoria apenas é identificada a nível local, uma vez que, apesar de os BEV não produzirem emissões durante as viagens, a geração de energia elétrica produz. Neste caso, o aumento dos EVs na frota de veículos apenas melhora a qualidade do ar em áreas urbanas [11], uma vez que são estas as áreas com maior densidade de veículos. É ainda importante considerar que estas melhorias acontecem, não apenas pelas áreas urbanas terem maior volume de veículos, mas ainda pelo facto das centrais de energia se localizarem geralmente em áreas rurais, afastadas de centros altamente populados.

Os incentivos financeiros também desempenham um papel importante no aumento deste valor, sendo que muitos países, como o China, EUA e a maioria dos países da Europa Ocidental, já incentivam a escolha do EVs desde a isenção do imposto de circulação e redução do preço na

compra (UK) ao estacionamento gratuito e isenção aos pagamentos de portagens (Noruega) [12].

Pelos motivos acima descritos o número das vendas de EVs tem vindo a aumentar. Este aumento cria novos desafios, tais como a queda de tensão, aumento de perdas e sobrecarga das redes de distribuição [13][14]. O armazenamento de energia é também um desafio visto que os EVs associados à maioria dos resultados positivos anteriormente referidos utilizam baterias. Estas baterias podem ser usadas em ligações V2G como um dispositivo de armazenamento, fornecendo uma fonte de energia adicional, se necessário. No entanto, como em alguns cenários um grande número de veículos pode ser carregado ao mesmo tempo (e.g. quando os utilizadores chegam ao trabalho), o carregamento simultâneo de vários veículos pode produzir picos de carga elevados [13]. Esta característica, combinada com a possibilidade de reduzir os custos com energia elétrica associados ao carregamento e melhorar as condições da rede, são os motivos pelos quais os mecanismos de gestão de energia do lado da procura são necessários [4], sendo que apenas podem ser aplicados caso exista flexibilidade energética no lado da procura.

Posto isto, o trabalho descrito nesta dissertação foca-se na avaliação dos impactos provocados pelo carregamento de EVs no consumo de energia elétrica de edifícios e na forma como a flexibilidade energética existente pode ser utilizada para diminuir os eventuais efeitos negativos associados a estes carregamentos. Neste sentido, a Secção 1.2 apresenta os objetivos específicos para este trabalho.

## 1.2 Objetivos

No seguimento do enquadramento e motivação descritos na Secção 1.1, os seguintes pontos apresentam os objetivos específicos do presente trabalho:

1. Desenvolver uma metodologia para determinar os impactos provocados pelo carregamento de EVs no consumo de energia elétrica de um edifício. Entre outros aspetos, esta metodologia permite considerar diferentes níveis de integração de EVs, diferentes períodos de estacionamento, diferentes características dos EVs, as distâncias percorridas pelos veículos, entre outros.
2. Caracterizar a flexibilidade energética disponibilizada por um ou mais EVs, considerando as preferências dos utilizadores.
3. Desenvolver uma metodologia que permite a utilização da flexibilidade energética disponibilizada por um ou mais EVs para alcançar diferentes objetivos (e.g. redução do pico de procura).

4. Utilizar as metodologias desenvolvidas num caso de estudo, utilizando dados reais, e analisar os resultados obtidos. Neste caso, será considerado o DEEC e os seguintes dados reais:
  - Consumo de energia elétrica do DEEC;
  - Entradas no parque de estacionamento;
  - Distâncias percorridas por um conjunto de 49 condutores;
  - Características de carregamento e consumo de energia de vários EVs.

### 1.3 Estrutura do Documento

Este documento está organizado da seguinte forma: o primeiro capítulo apresenta uma breve introdução ao tópico abordado nesta dissertação, com as devidas motivações e objetivos. O segundo capítulo descreve a pesquisa relacionada com veículos elétricos, flexibilidade energética e mecanismos de gestão de carga, onde as noções básicas de ambos são apresentadas, bem como a descrição dos algoritmos e métodos usados para a sua implementação. O capítulo 3 apresenta as metodologias utilizadas, tanto para a avaliação de impactos como para as estratégias de gestão de carregamento propostas. No quarto capítulo o caso de estudo é apresentado bem como os respectivos resultados. Neste capítulo também é realizada a comparação entre os resultados obtidos em cada uma das estratégias e a discussão dos mesmos. O último capítulo consiste nas considerações finais onde são apresentadas as principais conclusões provenientes deste trabalho, as suas contribuições para a comunidade científica e oportunidades futuras de trabalho no tema.

## 2. Trabalhos Relacionados

Este trabalho foca-se na utilização da flexibilidade energética disponibilizada por veículos elétricos e na sua integração em estratégias de gestão de consumo de energia. Assim este capítulo aborda a caracterização da flexibilidade energética, as estratégias de gestão de consumo de energia, o funcionamento dos veículos elétricos e a sua utilização nas referidas estratégias.

### 2.1 Caracterização da Flexibilidade Energética

Considerando a literatura existente, existem duas fontes principais de flexibilidade energética, através da utilização de sistemas de armazenamento de energia térmica ou através do deslocamento da operação de determinados aparelhos. Quando se utilizam sistemas de armazenamento de energia térmica, o consumo energético de alguns aparelhos é antecipado ou atrasado com base no conforto térmico do utilizador, permitindo reduzir o consumo destes aparelhos noutros períodos (e.g. em horários com tarifas mais elevadas). Quando é aplicado o deslocamento de operação, o consumo de alguns aparelhos é deslocado para períodos com e.g. maior geração renovável ou tarifas mais reduzidas [15]. O trabalho descrito nesta dissertação foca-se no segundo método já que é o mais adequado para utilização de flexibilidade proveniente de EVs.

As metodologias utilizadas para caracterizar a flexibilidade energética dependem, normalmente, do objetivo da investigação e da definição de flexibilidade de cada investigador. A metodologia apresentada por Junker et al. em [16] apresenta a flexibilidade como uma função dinâmica, tal como ilustrado na Fig. 2.1. Ao contrário da maioria das abordagens onde a flexibilidade é considerada constante, neste caso a flexibilidade pode ser calculada durante estados transitórios. Isto é importante porque, em cenários onde a flexibilidade foi utilizada recentemente, o sistema ainda não se encontra num estado estável. Nesta metodologia, os edifícios são considerados inteligentes no sentido em que, quando recebem um sinal de penalidade externo, o edifício consegue adaptar o seu consumo energético de forma a minimizar uma determinada penalização acumulada. A função que caracteriza a flexibilidade energética é caracterizada por seis parâmetros, nomeadamente: (i) O atraso entre a mudança do sinal de penalização e a mudança na procura energética; (ii) o valor máximo de mudança no consumo; (iii) o tempo necessário para atingir a redução máxima no consumo; (iv) o tempo total com consumo reduzido; (v) a quantidade total de consumo de energia reduzido; e (vi) a quantidade total de consumo de energia aumentado.

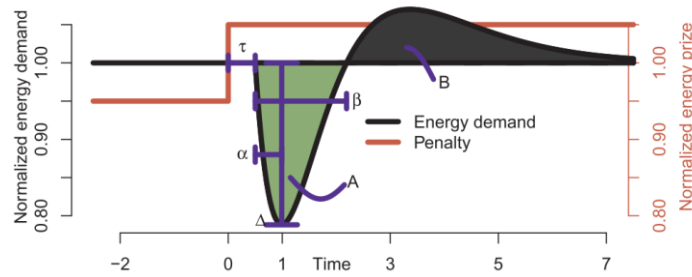


Fig. 2.1 – Caracterização da flexibilidade como função dinâmica em [16].

Na maior parte da literatura, a flexibilidade energética é definida como uma variável ou mais variáveis invariantes ao longo do tempo. Em [17], a flexibilidade é definida como o possível aumento ( $P_{inc}$ ) ou diminuição ( $P_{dec}$ ) na potência num determinado instante de tempo juntamente com a duração que esta mudança pode ser mantida com base no conforto e limites técnicos. Para fins ilustrativos, D'hulst et al. utilizaram dados do projeto LINEAR que se focou na pesquisa e demonstração de tecnologias de DR em grande escala conduzido na Bélgica. A Fig. 2.2 representa a metodologia de quantificação da flexibilidade energética utilizada neste trabalho.

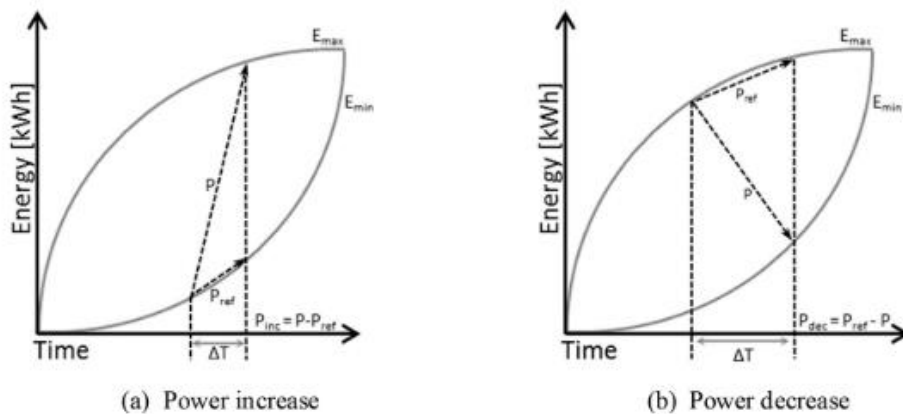


Fig. 2.2 – Representação conceptual da metodologia utilizada para quantificar a flexibilidade energética de [17] em [18]. (a) Flexibilidade utilizada para aumentar o consumo instantâneo. (b) Flexibilidade utilizada para reduzir o consumo instantâneo.

Em [19] Oldewurtel et al. abordam os efeitos de uma configuração agregadora de edifícios de escritórios. Embora o termo flexibilidade energética nunca seja utilizado, o objetivo do trabalho é determinar o potencial de modificação do consumo de energia de cada edifício. Também é fornecido ao agregador um índice com a energia adicional utilizada para produzir uma determinada mudança no consumo para cada edifício numa determinada hora do dia. Para isso é proposto um procedimento de avaliação baseado em *Model Predictive Control* que supõe que o edifício normalmente está em operação base e o potencial de deslocamento de energia  $\Delta P$ , é a quantidade de energia que um edifício pode desviar o seu consumo do consumo base, se

necessário. Para quantificá-lo são usadas curvas de eficiência onde a mudança de consumo de energia é representada em relação ao custo adicional com o consumo de energia ao longo do período de teste  $T$ , tal como ilustrado na Fig. 2.3. Seguindo esta abordagem é possível verificar as diferentes eficiências de deslocamento de energia para cada cenário. Essa eficiência é a razão entre o desvio máximo no consumo de energia durante o intervalo de tempo e o uso de energia adicional durante o período de teste  $T$ . As estratégias de controlo para determinar a quantidade de energia possível de desviar e a sua eficiência de deslocamento são baseadas no algoritmo fornecido em [19].

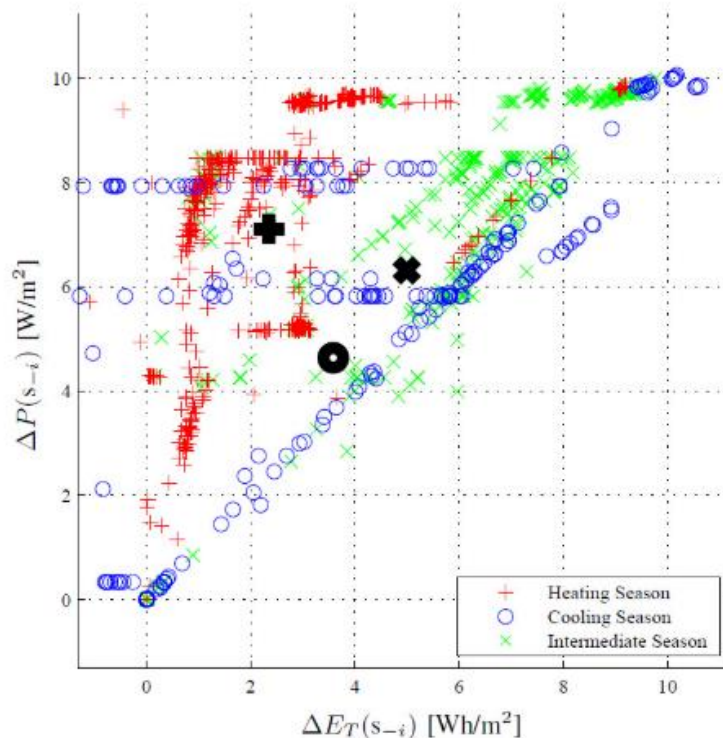


Fig. 2.3 – Eficiência do aumento do consumo representada pela mudança no consumo de energia  $\Delta P$  versus o uso adicional de energia durante o período de teste por estação [15].

A metodologia proposta por Nuytten et al. em [20], considera a utilização de um sistema combinado de calor e energia (CHP) com armazenamento de energia térmica. Os autores consideram dois cenários diferentes, nomeadamente, uma operação atrasada e uma operação forçada. Na operação atrasada, o máximo teórico da flexibilidade é o tempo em que a operação do CHP pode ser adiada enquanto a procura de energia é satisfeita pelo tanque de armazenamento. Por outro lado, na operação forçada, o CHP é forçado a entrar em operação enquanto o excesso de energia é armazenado. Em contraste com a operação atrasada, a diferença de tempo é agora medida como o tempo em que o CHP precisa para carregar a capacidade livre do tanque a qualquer momento, sendo a flexibilidade máxima definida como a quantidade de tempo que a operação do CHP pode ser forçada enquanto o excesso de calor

produzido é armazenado para uso posterior. Na Fig. 2.4, é possível observar à esquerda um exemplo para a representação da operação atrasada e à direita um exemplo referente à operação forçada. As curvas mínima e máxima são a energia acumulada fornecida pelo CHP quando o armazenamento é mantido a uma carga mínima e máxima respectivamente [15]. Esta metodologia é semelhante à apresentada por Six et al. em [21], que considerou a flexibilidade disponibilizada por um armazenamento de energia térmica (TES) combinado com bombas de calor residenciais.

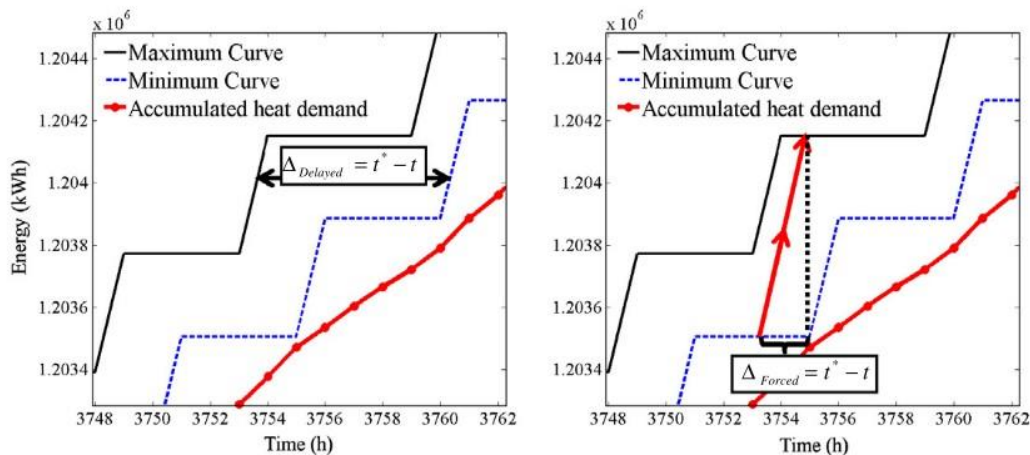


Fig. 2.4 – Perfil da flexibilidade da operação atrasada(esquerda) e forçada (direita) [20]

Outra caracterização possível é a adotada por De Coninck e Helsen [22][23], onde a flexibilidade é definida como uma função no tempo e quantificada como a possibilidade de desviar o consumo de eletricidade de um cenário base num determinado instante de tempo durante um determinado período de tempo. Os autores concentram-se em usar as propriedades térmicas do edifício para fornecer flexibilidade através do uso de serviços de aquecimento, ventilação e ar condicionado e armazenamento de energia térmica. Este trabalho considera três problemas diferentes de controlo e ao resolvê-los são capazes de determinar o custo de utilizar a flexibilidade de energia num determinado instante no tempo. No primeiro problema, os custos totais ao longo de um certo intervalo de tempo são minimizados, enquanto a temperatura ambiente é mantida dentro da zona de conforto. O segundo visa desviar-se da solução de menor custo, utilizando a flexibilidade para minimizar o consumo de energia elétrica durante o intervalo de tempo. Contrariamente, o terceiro problema visa maximizar o consumo de energia elétrica. Estas três otimizações podem ser usadas para criar uma curva de custo e pontos intermediários podem ser obtidos a partir da curva de custo, resolvendo o problema de controlo para níveis de potência intermediários. A curva de custos resultante é apresentada na Fig. 2.5 (a). Se esta curva for calculada ao longo do tempo é possível obter um diagrama com a flexibilidade máxima e mínima disponível no período em questão como é observado na Fig. 2.5 (b).

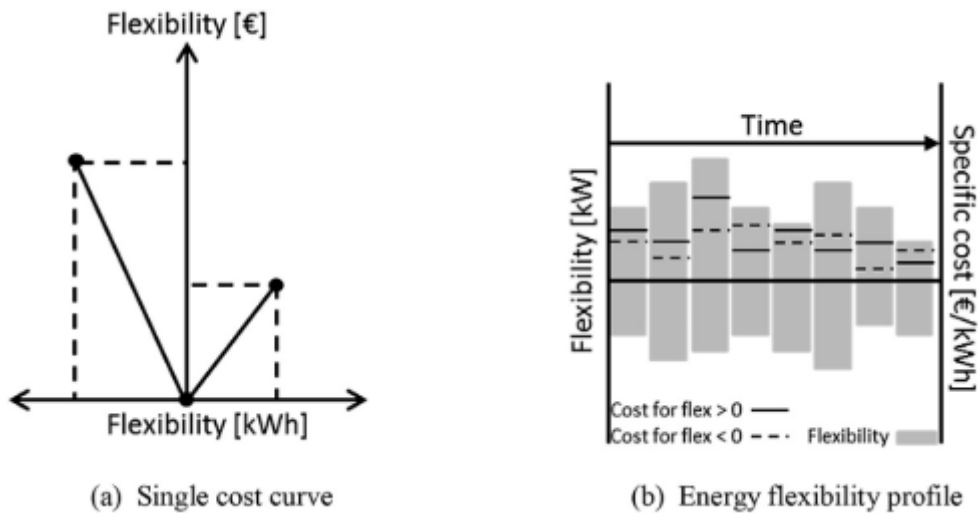


Fig. 2.5 – Comparação da curva de custo para utilização da flexibilidade. a) curva de custo singular. b) curva de custo ao longo do tempo. [18].

## 2.2 Gestão do consumo de energia

No final da década de 70, depois de uma crise relacionado com o produção e fornecimento de petróleo, que veio causar um grande aumento no custo dos serviços de distribuição de energia, começaram a ser desenvolvidos estudos no campo da gestão do consumo de energia, *Demand Side Management* (DSM), com o objetivo de melhorar a eficiência energética geral e reduzir os picos de carga [24][25].

No início, os métodos de DSM eram considerados como o planeamento, implementação e monitorização de atividades ou programas em dispositivos elétricos, de maneira a influenciar o consumo de energia elétrica e assim produzir mudanças no seu perfil de consumo. Os métodos de DSM incluíam apenas as atividades que envolviam uma intervenção deliberada sobre os equipamentos para alterar os respetivos perfis de consumo. Dentro desta definição, as substituições de equipamentos elétricos por outros com maior eficiência energética ainda não eram consideradas como DSM [26].

Ao longo dos anos, a definição de DSM tem vindo a sofrer alterações de forma a englobar, para além da gestão do consumo, também a eficiência energética e o termo DSM tem vindo a ser substituído por *Demand-Response* (DR) [25].

Apesar destas mudanças de conceito e terminologia, os objetivos da DSM têm se mantido os mesmos. Embora neste trabalho o objetivo da utilização de DSM seja a redução de custos para o consumidor, esta também pode contribuir para o melhor funcionamento da rede através, por

exemplo, da regulação da frequência e da tensão. A Fig. 2.6 apresenta os principais objetivos dos métodos de DSM associados à alteração de perfis de consumo.

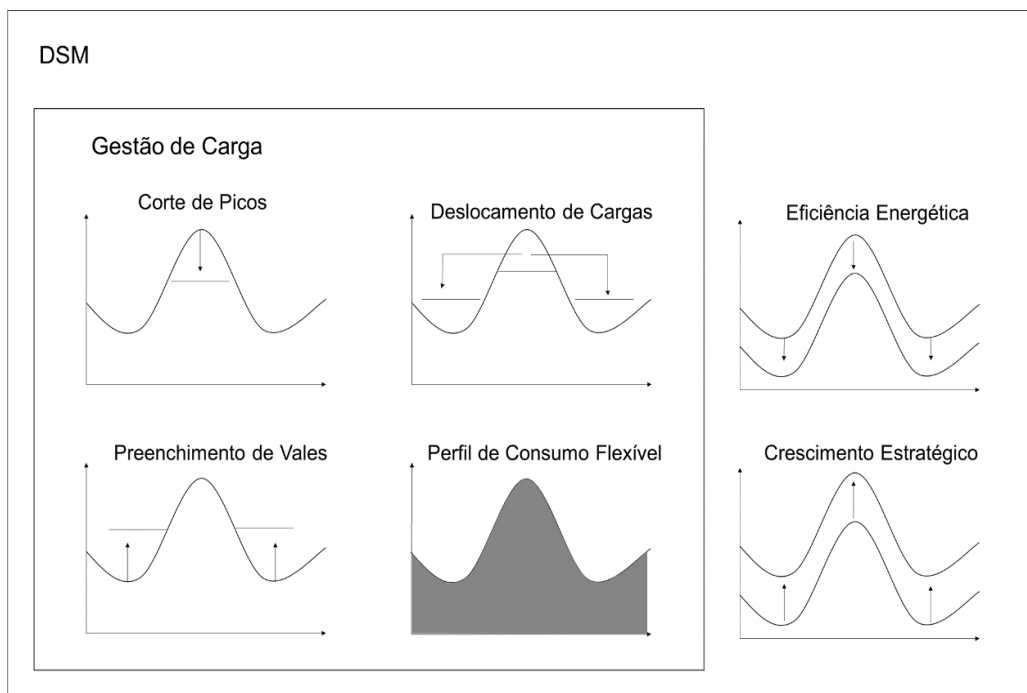


Fig. 2.6 – Objetivos dos métodos de Demand Side Management [27].

Existem seis objetivos principais dos métodos de DSM no que toca à alteração do perfil de consumo: (i) corte de picos; (ii) preenchimento de vales; (iii) deslocamento de cargas; (iv) gestão dinâmica de energia; (v) eficiência energética; e (vi) crescimento estratégico.

O corte de picos ou redução de picos de consumo é um dos exemplos mais clássicos de DSM. Neste caso, o valor máximo de consumo é reduzido, normalmente através da utilização de controlo direto de cargas. Assim em momentos em que o consumo é demasiado elevado alguns aparelhos podem ser desligados. Apesar da maioria das aplicações de DSM considerarem o corte de picos como um modo de aumentar a capacidade de um sistema de distribuição, o controlo de cargas pode ser utilizado para reduzir os custos de operação da rede evitando despachos.

Preenchimento de vales é outro exemplo clássico de DSM. O preenchimento de vales engloba o aumento do consumo em horários fora de pico. Isto pode ser benéfico em cenários em que o consumo elétrico em determinados horários ajude a reduzir custos para o consumidor. Um dos exemplos mais populares é através da adição de sistemas de armazenamento de energia térmica (tipicamente aquecimento de águas quentes sanitárias ou climatização) ao invés da utilização de aquecedores alimentados a combustíveis fósseis.

O deslocamento de cargas é outro dos exemplos clássicos de DSM. Este método envolve deslocar cargas de períodos de pico para períodos com consumos mais baixos. Os exemplos típicos incluem normalmente a utilização de sistemas de armazenamento térmico. Parte do trabalho descrito nesta dissertação foca-se na utilização de DSM através do deslocamento do consumo associado ao carregamento de veículos elétricos. O carregamento dos veículos é deslocado no tempo de modo a atender a uma função objetivo.

No caso das medidas relacionadas com eficiência energética, estas incluem a utilização de equipamentos com melhor eficiência energética bem como mudanças nos padrões dos utilizadores. Estas mudanças podem ser atingidas através de feedback aos utilizadores sobre o seu consumo ou campanhas de *marketing* e consciencialização. Estas medidas refletem-se não só em reduções gerais no consumo, mas também nos padrões de consumo do sistema.

O crescimento estratégico refere-se ao aumento geral no consumo (além do preenchimento de vales). O crescimento do consumo pode envolver o aumento da participação no mercado das cargas que são, ou podem ser, servidas por combustíveis concorrentes. No futuro, o crescimento de carga pode incluir a eletrificação de consumos de associados a outras formas de energia. Esta estratégia refere-se, por exemplo, à introdução de novas tecnologias em torno de veículos elétricos, aquecimento de processos industriais ou automação. Este aumento da eletrificação do consumo é movido sobretudo pelos recentes esforços na redução do consumo de combustíveis fósseis.

Por fim a gestão dinâmica de energia envolve a previsão de consumo e utilização da flexibilidade energética para melhorar a qualidade de serviço e condições da rede. A carga pode ser flexível se os clientes estiverem dispostos a trocar qualidade do serviço e comodidade por incentivos. No entanto a utilização da flexibilidade energética não implica a redução de qualidade de serviços nem de comodidade. Os programas podem envolver utilização de cargas interrompíveis e sistemas de gestão de energia [26].

O conceito moderno de DSM foca-se no uso efetivo e eficiente da energia elétrica, consequentemente a maior parte das pesquisas e implementações tendem a focar-se mais em eficiência energética e gestão do consumo [28]. Como tal existem muitos exemplos de implementação de DSM na literatura. Como mencionado anteriormente um dos exemplos mais típicos é a utilização de DSM para condicionar o funcionamento de sistemas de aquecimento de águas residuais de modo a reduzir picos de consumo como em [29] e [30]. Atualmente alguns países como França e Grã-Bretanha já têm sistemas de DSM comercialmente ativos no entanto na maior parte da Europa os sistemas de DSM ainda se encontram com pouco ou nenhum desenvolvimento [31].

## 2.3 Utilização de Veículos Elétricos

Este trabalho foca-se na utilização de veículos elétricos e da flexibilidade energética oferecida pelos mesmos para implementar DSM. Assim, as próximas secções apresentam informação sobre o funcionamento de EVs, bem como, as diferentes topologias existentes, modos de carregamento e utilização dos mesmos em sistemas de DSM.

### 2.3.1 Veículos Elétricos

Um veículo elétrico é um veículo que utiliza motores elétricos como fonte de propulsão. Um veículo elétrico pode ser alimentado por uma fonte externa ou ter alimentação autónoma através de baterias, geradores instalados no veículo ou até mesmo painéis fotovoltaicos como no caso do avião *Solar Impulse* [32]. No que toca à alimentação externa esta é sobretudo presente em comboios e metropolitanos uma vez que a natureza fixa das linhas férreas faz com que seja relativamente fácil alimentar os veículos através de linhas aéreas ou trilhos eletrificados eliminando assim a necessidade de baterias. No entanto estes veículos permitem pouca liberdade de locomoção quando comparados com veículos autoalimentados. Os veículos autoalimentados incluem carros, bicicletas, trotinetes, entre outros. Neste trabalho o foco são os carros elétricos.

Como referido anteriormente os veículos elétricos utilizam motores elétricos para se locomoverem, no caso dos carros diferentes tipos de motores são utilizados por diferentes fabricantes, os mais comuns são motores de indução e motores de corrente contínua com e sem escovas [33]. Apesar das tecnologias já se considerarem num estado de desenvolvimento avançado é expectável que os preços dos motores elétricos venham a descer devido às inovações nos processos de produção. Outro componente crucial dos EV é a bateria, que é, normalmente, a principal fonte de energia para o motor. Estas baterias são especializadas para mobilidade elétrica e como tal possuem características que as tornam aptas para utilização em EVs, algumas dessas características são: (i) Alta densidade energética atingível com um carregamento de modo a permitir maior autonomia. (ii) Ciclo de vida longo com mecanismos de manutenção livre e alta segurança incorporados na bateria. (iii) Ampla aceitação como reciclável do ponto de vista ambiental.

Outros componentes importantes incluem um controlador que regula a potência entregue ao motor e travões regeneradores que permitem recuperar parte da energia cinética do veículo no momento da travagem. Estes travões também aumentam a vida útil dos travões convencionais uma vez que estes não se desgastam tanto [34].

Atualmente as principais tecnologias de bateria são: Chumbo-ácido (Pb-ácido), Níquel-Hidreto Metálico (NiMH), Íon Lítio (Li-íon) e Polímero de Lítio (LiPO) [35]. Devido à facilidade de reverter o processo de incorporação dos íões de lítio no cátodo, as baterias Li-íon são capazes

de carregar e descarregar muito mais rapidamente do que as convencionais Pb-ácido e NiMH. Para além disso as baterias Li-íon têm uma maior densidade energética quando comparadas com as baterias NiMH, sendo 40% menores e pesando cerca de metade. Isto permite a incorporação de quase o dobro das baterias, o que aumenta a autonomia do veículo. Estas características tornam-nas no tipo de bateria mais utilizado em EVs. Apesar da sua alta densidade energética quando comparada com outros tipos de bateria, as baterias de Li-íon possuem apenas 10% da densidade energética dos combustíveis fósseis convencionais [33]. Outra desvantagem destas baterias é o preço que pode chegar até 40% do custo total do veículo [36]. No entanto espera-se que os custos de manufatura mantenham a sua tendência e continuem a diminuir [37]. De modo a aumentar a autonomia dos EVs, tecnologias como Lítio-Enxofre e baterias de estado sólido estão a ser exploradas, porém ainda se encontram em estados de desenvolvimento muito precoces.

Por fim outro componente que diferencia os veículos elétricos dos convencionais são os sistemas de travagem regenerativa. Estes dispositivos permitem ao veículo recuperar parte da sua energia cinética e carregar a bateria durante a travagem o que pode aumentar em até 25% a autonomia do veículo [34]. Esta tecnologia agrega também outras vantagens como: (i) maior controlo sobre a travagem; (ii) maior eficiência em situações de para-arranca; e (iii) redução do desgaste dos travões convencionais. Estes sistemas funcionam com base na capacidade dos motores elétricos funcionarem como motor e gerador. Assim quando o utilizador pressiona o pedal dos travões o motor é acionado e utiliza o binário existente nas rodas como fonte de potência mecânica e alimenta a bateria. Isto não só faz com que a autonomia elétrica do veículo aumente, como também aumenta a economia de combustível no caso dos veículos híbridos. Este tipo de travagem é especialmente eficiente em situações de para-arranca já que os travões regenerativos fornecem a maior parte da força de travagem necessária em situações de baixa velocidade [34]. Nestes sistemas o componente mais importante é o controlador, já que este, como o nome indica, controla o funcionamento do motor. As suas funções incluem monitorar a velocidade das rodas, calcular o seu binário e a energia gerada a ser enviada para a bateria. Normalmente este controlador controla o motor tanto durante a travagem como durante a circulação pelo que algoritmos de controlo que otimizam tanto a circulação como a travagem, podem aumentar significativamente a autonomia do veículo. Estes controladores podem incluir a utilização de sistemas de controlo inteligente que fornecem feedback ao utilizador sobre a sua condução de modo a ajudá-lo a conduzir num regime que otimiza a autonomia [38], controlo baseado nas condições rodoviárias [39] e até mesmo métodos de condução autónoma que permitem ao veículo poupar energia através do uso inteligente destes sistemas de travagem [40].

Atualmente existem 5 principais tipos de EVs que variam consoante a fonte de energia e a integração do motor elétrico com o convencional motor de combustão interna. Os principais tipos de EVs são veículos elétricos com baterias (BEVs), veículos elétricos híbridos (HEVs), veículos elétricos híbridos *plug-in* (PHEVs), veículos elétricos de alcance estendido (REEVs) e

veículos de célula de combustível (FCEVs) [33]. Os BEVs são movidos exclusivamente por um motor elétrico alimentado por uma bateria a bordo. Esta bateria necessita de ser carregada regularmente, para isso normalmente são utilizados carregadores integrados na rede elétrica. Estes veículos possuem o maior rendimento dentro de todos os sistemas de propulsão de veículos, onde tipicamente cerca de 80% da energia armazenada é convertida em movimento [33]. Outras vantagens são a redução de emissões e ruído quando circulam. No entanto estes ainda possuem baixas autonomias quando comparados com veículos convencionais de combustão interna. A duração do carregamento é normalmente relativamente longa e atualmente não há grande disponibilidade de estações de carregamento.

Os HEVs combinam o motor elétrico com um motor a combustão, sendo que o motor elétrico auxilia o motor convencional durante a circulação. Apesar de não ser possível carregar a bateria destes veículos ao liga-lo à rede elétrica, o sistema de travões regeneradores e o motor elétrico cumprem essa função. Apesar destes veículos ainda emitirem GEEs durante a sua circulação estas são reduzidas já que durante a maior parte do tempo o motor de combustão não trabalha a plena carga e é auxiliado pelo motor elétrico. Existem várias maneiras de integrar ambos os motores como apresentado na Fig. 2.7. A configuração série-paralelo permite ao veículo circular com proporções variáveis de carga em cada motor. Assim é possível circular apenas com o motor convencional ou apenas com o motor elétrico, no entanto a locomoção 100% elétrica tipicamente só é possível em deslocamentos curtos.

De forma semelhante aos HEVs os PHEVs combinam um motor elétrico com um motor a combustão, no entanto a bateria integrada pode ser carregada a partir da rede elétrica. A autonomia elétrica dos PHEVs costuma ser maior do que a dos HEVs, porém menor do que os BEVs já que as suas baterias são dimensionadas para pequenas deslocações urbanas. Estes veículos são economicamente atraentes já que combinam a mobilidade elétrica que permite redução do consumo de combustíveis fósseis com a maior autonomia do motor convencional, tal como os HEVs, mas ainda adicionam a possibilidade de carregar o veículo em casa.

Os REEVs são veículos híbridos com uma configuração em série [41]. Nesta configuração o motor de combustão não está conectado à transmissão do veículo. Ao invés de ser usado como propulsão, o motor de combustão é utilizado como um gerador e é utilizado para carregar a bateria do carro quando está descarregada e o veículo estiver em andamento. Apesar da bateria ser carregada através do trabalho gerado pelo motor de combustão interna, esta também pode ser ligada à rede. Uma das principais vantagens destes veículos é a possibilidade de o motor de combustão interna ser pequeno, já que só é utilizado quando o veículo ultrapassa a autonomia fornecida pela bateria. Isto ajuda a reduzir o peso do veículo, o que possibilita maiores autonomias. Além disso estes veículos podem ser abastecidos em estações de serviço convencionais e não apenas em carregadores como é o caso dos BEVs.

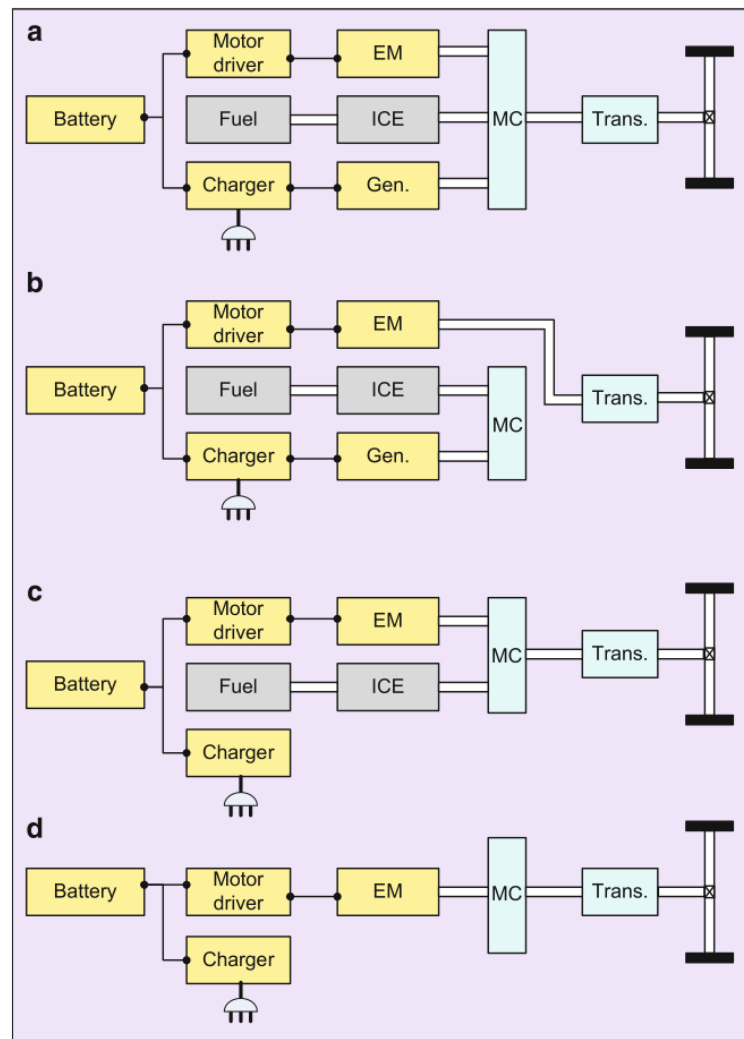


Fig. 2.7 – Arquiteturas de EVs, PHEV série-paralelo, (b) PHEV série, (c) PHEV paralelo, (d) BEV, adaptada de [42].

O último grupo de veículos a serem considerados são os FCEVs. Estes veículos ao invés dos anteriores, não possuem uma bateria que armazena a energia. Nestes veículos a energia é produzida através de uma pilha de células de combustível. Estas células utilizam hidrogénio armazenado em um tanque e oxigénio proveniente do ar. Isto faz com que estes veículos apenas emitam vapor de água durante a sua circulação. As principais vantagens destes veículos são a maior autonomia face aos restantes veículos elétricos e o rápido abastecimento. No entanto a tecnologia de células de combustível ainda não está muito desenvolvida e devido ao tamanho e peso das células de combustível estas de momento são utilizadas em veículos de médio a grande porte e poucos modelos estão comercialmente disponíveis. Outra desvantagem é o reduzido número de estações de serviço que fornecem hidrogénio.

No que toca ao abastecimento, os PHEVs, HEVs e REEVs podem ser atestados nas estações convencionais, os REEVs e PHEVs também podem carregar diretamente a bateria e

os BEVs são limitados a apenas poderem carregar a bateria. Existem 3 principais formas de carregamento, nomeadamente, (i) *plug-in*; (ii) troca de bateria; e (iii) carregamento sem fios, sendo *plug-in* o método mais comum. Quando é utilizado o *plug-in* o veículo está fisicamente conectado a um ponto de carregamento e a energia é fornecida através de um cabo. Existem 4 modos de carregamento tipicamente diferenciados pelas suas infraestruturas e nível de comunicação entre o veículo e a estação de carregamento. Os modos especificados na norma IEC 61851 [43] apresentados em [44] e em [45], encontram-se descritos na Tabela 1. Tipicamente consideram-se dois tipos de carregamento, o lento, onde é utilizada uma ligação monofásica AC com 230V e até 16 A, e o rápido onde a conexão pode ser tanto monofásica como trifásica com correntes de até 63A.

Tabela 1 – Modos de carregamento de EVs segundo a norma IEC 61851

| <b>Modo</b> | <b>Potências de Carregamento</b> | <b>Localizações Típicas</b>  |
|-------------|----------------------------------|--|
| Modo 1      | 3.3-11 kW                        | Residências  |
| Modo 2      | 3.3-22 kW                        | Residências  |
| Modo 3      | 10-50 kW                         | Residências com tomadas especiais e postes de carregamento públicos                    |
| Modo 4      | 50-120 kW                        | Áreas de serviço em autoestradas e estações de carregamento dedicadas em áreas urbanas |

O Modo 1 é permite o carregamento do veículo através da utilização de cabos e tomadas domésticas. Este carregamento é feito através de corrente alternada e normalmente a potência de carregamento é de 3,7 kW. O modo 2 também utiliza tomadas domésticas, mas com cabos especiais fornecidos pelos fabricantes. Estes cabos possuem um dispositivo eletrónico que controla o carregamento e protege o veículo e a instalação elétrica em que este se encontra ligado. O modo 3 utiliza tomadas especiais e um circuito dedicado que possibilita o carregamento com níveis de potência mais altos podendo chegar em até 22 kW. Os pontos de carregamento podem ser tomadas especiais instaladas na parede, usadas normalmente em residências ou postes de carregamento tipicamente vistos em espaços públicos. Este modo também inclui mais proteções do que os anteriores já que o ponto de conexão à rede e o equipamento utilizado é específico para carregamento. O modo 4 fornece alta potência, até 120 kW, através de corrente contínua. O conversor AC/DC encontra-se no ponto de carregamento e não no veículo como nos outros níveis. Este modo, no entanto, apresenta a desvantagem de utilizar correntes altas o que faz com que as perdas na transmissão aumentem e a vida útil da bateria diminua. Além disso os

pontos de carregamento do modo 4 são mais caros do que os dos modos anteriores. Neste trabalho foi considerada a utilização de carregamento com *plug-in* já que esta é a mais utilizada e a que mais facilmente permite gestão de carregamento.

A troca de bateria é baseada na possibilidade de alugar uma bateria que depois de esgotada pode ser substituída por uma bateria totalmente carregada numa estação de serviço dedicada. Este sistema agrega várias vantagens como:

- A bateria é carregada na sua totalidade em poucos minutos;
- O utilizador não necessita de sair do veículo;
- O utilizador não é responsável pela manutenção e conservação da bateria;
- A autonomia do veículo pode considerar-se ilimitada se existir uma grande cobertura de estações de serviço.

Apesar destas vantagens este método não é muito utilizado já que as estações de troca possuem um custo elevado de construção e não existe uma norma para o modelo das baterias nos EVs. Assim cada estação tem de se especializar em modelos específicos [44].

Outra alternativa é o carregamento sem fios. Neste caso uma bobina primária é colocada no solo ou abaixo deste e uma secundária é colocada no fundo do chassis do veículo e a energia é transmitida através de indução eletromagnética [46]. De modo a reduzir o tamanho necessário dos equipamentos são utilizadas frequências de ressonância altas (até 100 kHz). Este sistema não necessita normas para conectores nem baterias e permite o carregamento do veículo em movimento o que reduziria a necessidade de baterias com alta capacidade nos veículos. No entanto este sistema é mais caro do que um sistema com conectores e atualmente encontra-se pouco desenvolvido mas países como Alemanha e Coreia do Sul têm promovido investigação nesta área [46].

### 2.3.2 Estratégias de gestão utilizando veículos elétricos

O surgimento de veículos elétricos abre as portas para a exploração de oportunidades de agregadas a estes [4]. As estratégias a seguir são específicas para a implementação de DSM com veículos elétricos.

Como explicado por Schuller et al. no primeiro capítulo de [24], a fim de utilizar a flexibilidade energética disponibilizada por um veículo elétrico dentro de um sistema, o processo de carregamento deve ser coordenado. Essa coordenação pode ser realizada através de diferentes estratégias de controlo e comunicação. Existem três arquiteturas principais para a coordenação de carregamento: centralizada, hierárquica e distribuída. Como Schuller et al. aponta, as abordagens centralizadas têm maior fiabilidade no controlo do carregamento e podem ser facilmente integradas nos paradigmas de controlo de sistemas de energia existentes. No entanto,

essas estratégias exigem uma quantidade maior de informação e, na maioria das vezes, não são tão escaláveis como as estratégias distribuídas.

As estratégias distribuídas são geralmente construídas em mecanismos baseados em preços. Embora estas exijam uma maior troca de informação, o número de parâmetros transmitidos é menor e o tamanho do problema de decisão é confinado a um veículo elétrico. Essas estratégias podem permitir que os utilizadores interfiram mais facilmente no processo de decisão. A coordenação hierárquica situa-se num meio termo entre a coordenação centralizada e distribuída, uma vez que esta pode incorporar o controlo centralizado, mas limitam o tamanho do problema de controlo a áreas definidas do sistema. Esta abordagem divide o problema de otimização num conjunto de otimizações locais interconectadas. É importante notar que esta classificação de centralizada, hierárquica e distribuída nem sempre é nítida. Existem muitas estratégias de coordenação que misturam características dos três tipos. Esta classificação é apenas uma possibilidade de como organizar e agrupar diferentes estratégias de coordenação de carregamento.

Em relação ao objetivo da estratégia de gestão de energia, os dois objetivos mais comuns entre autores são a gestão de consumo e os objetivos económicos, tais como a redução de fatura ou redução do preço do mercado do dia seguinte [24].

Começando pelos objetivos económicos, no capítulo 7 de [24], Di Giorgio et al. apresenta uma estrutura de controlo preditivo para controlar o carregamento de veículos elétricos. Os veículos são agrupados em áreas de carga. As áreas de carga são partes da rede sob uma subestação secundária definida pelo operador do sistema de distribuição. O controlador proposto trabalha sob três requisitos, nomeadamente : (i) busca da minimização de custos, mantendo a flexibilidade de tempo e preferência do estado de carga desejado do utilizar; (ii) seguimento da referência de potência da área de carga fornecida pelo operador do sistema de distribuição; e (iii) integração de fontes de energia renovável na área de carga, mas evitando injeção na rede. Este trabalho inova em alguns aspectos. Primeiramente, o controlador trabalha segundo uma base de tempo. O controlador atualiza o sinal de controlo de carregamento periodicamente com base nos eventos acionados durante o período de amostragem. Cada veículo tem o seu próprio sinal de controlo que é adaptado e atualizado considerando o horário de chegada, preferências do utilizador e flexibilidade no tempo de estacionamento. Isto é feito para explorar a natureza variável do preço da energia ao longo do tempo. Tanto a taxa de carregamento quanto a V2G são modeladas como variáveis booleanas ou semi-contínuas. Como o controlador monitora a referência de potência agregada da área de carga, os efeitos de várias sessões de carregamento podem ser atenuados através da gestão da flexibilidade do utilizadores. Isto leva a evitar períodos com grande consumo de energia, optando por não carregar alguns veículos. Como este trabalho também considera a integração de fontes de energias renováveis na área de carga, o controlador também atua para maximizar o autoconsumo da geração fotovoltaica. A degradação da bateria

também é considerada na função objetivo. Ao fazer isto é possível equilibrar os benefícios de múltiplas ativações da bateria e a redução do seu ciclo de vida.

Também em [24], no capítulo 9, Balram et al. propõe um modelo matemático para um agregador participando no mercado do dia seguinte. Juntamente com o modelo, dois métodos são fornecidos para programar o carregamento dos veículos. Os métodos são JSM, sigla em inglês de *Joint Scheduling Method* e ASM, de *Aggregator Scheduling Method*. No JSM, o agendamento dos carregamentos é realizado por uma entidade central que também planeia o despacho dos geradores. O operador central recebe dados das baterias dos veículos elétricos e dos geradores e com essa informação é capaz de programar tanto a geração como o consumo para minimizar os custos totais de energia. A função objetivo do modelo de mercado é minimizar o custo total de geração para suprir a carga ao longo do horizonte de tempo. No ASM o agregador pode ser comparado em funções com um revendedor de energia elétrica. O agregador planeia a participação no mercado do dia seguinte, programando o carregamento de veículos elétricos de forma independente, com o objetivo de minimizar o custo total da cobrança. Quando aplicado aos estudos de caso, o sistema de teste IEEE 30-bus, ambos os métodos provaram ser vantajosos. Embora o JSM tenha se mostrado útil numa configuração de mercado onde existe a possibilidade de programar tanto a produção quanto o consumo, a sua implementação pode exigir mudanças na estrutura operacional do mercado. Por outro lado, o ASM poderia ser usado onde os participantes individuais do mercado precisariam do seu próprio agendamento.

No mesmo livro [24] no capítulo 10, Fotuhi-Firuzabad et al. descrevem um algoritmo de carregamento de veículos elétricos híbridos que agenda tanto a potência de carregamento como o tempo de carregamento com base no nível de conforto do utilizador. Este problema de otimização tenta especificamente minimizar o tempo de espera por uma carga completa e, ao mesmo tempo, minimizar o custo com energia elétrica. A tarifa é considerada dinâmica, sendo que neste caso a tarifa da eletricidade tem níveis definidos durante as horas do dia. Cada veículo é programado no momento que é conectado e é atualizado sempre que um novo veículo é conectado. Minimizar o pagamento é o principal fator atrativo para os clientes. Para não sacrificar o conforto do utilizador, as suas restrições de conforto devem ser incluídas no processo de controlo. Aqui o fator de inconveniência da função objetivo é o tempo de espera até à carga total. Com esta implementação, os períodos de carregamento de veículos elétricos geralmente mudam para os períodos tarifários fora do horário de pico. Além disso, à medida que a função de inconveniência aumenta, a programação de carregamento começa a comportar-se de maneira semelhante ao carregamento não controlado, onde os veículos começam a carregar assim que são conectados. Este trabalho também mostra que com esta implementação, a resolução dos problemas de controlo de cada casa, não apenas reduz o custo total da cobrança, mas também apresenta melhorias nos sistemas de distribuição, como a redução da carga de pico e a relação entre o pico e a média.

Também é importante considerar o papel dos veículos elétricos no mercado do dia seguinte. Bessa et al. abordam a otimização de um agente de agregação no mercado do dia seguinte [47]. A definição do agregador é semelhante à fornecida por Peças Lopes et al. em [48], onde o agregador atua como um revendedor de energia elétrica que define tarifas para os seus clientes. O agregador compra energia para carregamento de veículos elétricos, mas, como esperado, não tem influência sobre o padrão de mobilidade dos utilizadores, portanto, a mobilidade dos utilizadores não é limitada pelo sistema. Dois grupos principais de clientes são considerados: clientes que permitem agendamento do processo de carregamento e clientes que não o fazem. Uma nota importante é que os autores consideram como uma forma de promover o carregamento controlado, a possibilidade de menor tarifa quando os veículos permanecem conectados por longos períodos. Isto é importante porque com mais veículos conectados o agregador possui mais flexibilidade energética disponível. Neste caso, considera-se que o agregador atua apenas no mercado do dia seguinte e de reserva. O agregador define as suas ofertas através da previsão do consumo total dos veículos elétricos, disponibilidade de veículos e preços de energia para cada hora do dia. Ao licitar nos mercados, o agregador transfere os tempos de carregamento para períodos de tarifa mais baixa e as suas propostas são colocadas nas mesmas horas. Este trabalho demonstra que os custos podem ser minimizados por meio da combinação de estratégias de DSM e de licitação, além de provar a possibilidade de prever comportamento e padrões do utilizador que por sua vez podem ser usados para prever a sua flexibilidade energética.

Semelhantemente aos trabalhos de Bessa et al., Vagropoulos et al. também fornece métodos para otimizar a licitação de um agregador que participa no mercado elétrico do dia seguinte [49]. Neste caso, o agregador resolve os respetivos problemas de otimização baseado em programação linear estocástica de dois estágios e leva em conta as incertezas relacionadas com as condições de mercado e as características da frota de veículos elétricos. A principal contribuição deste trabalho consiste em levar em conta incertezas como o comportamento semi-aleatório dos condutores, potência contratada utilizada em tempo real e também considerar desvios de energia. Estes desvios são classificados pelos autores como “instruídos” ou “não instruídos”, sejam eles responsabilidade do operador do sistema ou do agregador de veículos. Isto é utilizado para penalizar o agregador se uma previsão incorreta for feita.

O trabalho de Faddel et al. em [50] é semelhante aos dois anteriormente mencionados. Neste caso, o agregador é um operador de um parque de estacionamento que compra energia do mercado do dia seguinte sendo o objetivo maximizar o lucro do operador. Os autores usam lógica Fuzzy para abordar o problema das incertezas associadas aos preços do mercado, estado de carga do veículo, capacidade da bateria e carga exigida pelos proprietários, fazendo a *fuzzyfication* das restrições do problema, em vez de cada um dos parâmetros incertos. Isso reduz a complexidade do problema de otimização. Embora esta solução se mostre ineficiente quando

se considera apenas o mercado do dia seguinte, os lucros obtidos quando se leva em consideração tanto o mercado do dia seguinte como mercado em tempo real são mais altos do que os obtidos pela abordagem determinística equivalente.

Erdinc et al. estudaram a integração de veículos elétricos através de soluções veículo-rede (vehicle-to-grid) e veículo-casa (vehicle-to-home) em [51]. Estes investigadores propõem um modelo para a estrutura de um sistema de gestão de energia doméstico, construído através de PLIM (programação linear inteira mista). Este modelo é utilizado para investigar uma avaliação colaborativa de uma estratégia de DSM baseada em preços dinâmicos, a capacidade veículo-casa do veículo elétrico, um sistema de armazenamento de energia e um sistema de geração renovável de pequena escala. O diagrama de blocos que representa a estratégia de DSM é apresentado na Fig. 2.8. Como é possível ver, o gestor de energia residencial da casa (HEM) regula a operação de cada entidade considerando os sinais enviados pela entidade de serviço de carga através do medidor inteligente. O objetivo do gestor de energia é reduzir o custo diário de consumo de energia elétrica. As variáveis de preço são consideradas dependentes do tempo, similarmente à literatura anteriormente apresentada. Neste trabalho também é considerada uma penalidade artificial para criar uma ordem de prioridade ao vender energia a partir dos recursos. Considera-se que o sistema de gestão de energia primeiro tenta vender energia proveniente das fontes fotovoltaicas, de seguida do armazenamento de energia e como último recurso, do veículo elétrico. Os resultados dos casos de estudo mostram uma redução de custos de até 65,3% ao considerar cenários que utilizam tanto soluções veículo-casa e veículo-rede, bem como soluções armazenamento-casa e armazenamento-rede.

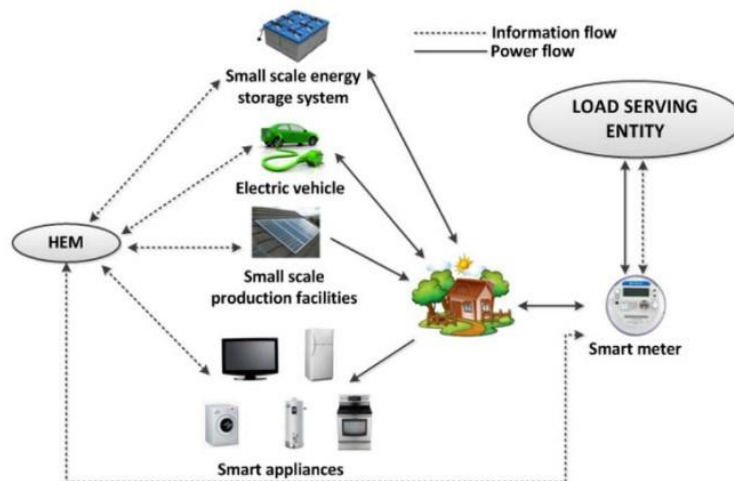


Fig. 2.8 – Diagrama de blocos de uma estratégia de DSM em casas inteligentes [51].

Considerando soluções distribuídas, Grau Unda et al. desenvolveram um sistema de controlo baseado em agentes [52]. O sistema é multinível, como demonstrado na Fig. 2.9. Duas grandes entidades são consideradas, nomeadamente: o agregador de veículos elétricos e o operador do sistema de distribuição. O agregador de veículos elétricos é responsável pela gestão do carregamento das baterias dos veículos e é constituído por três tipos de agentes (agente EV, agente local de área e agente coordenador). O operador do sistema de distribuição (DSO) é responsável pela operação da rede de distribuição dentro de restrições técnicas. O agente do DSO é o único agente existente nesta entidade. O agente EV é responsável por recolher dados do veículo elétrico, tais como o estado real da carga, o estado desejado no final da sessão de carregamento, a taxa de potência do carregamento, entre outros. Estas informações são enviadas pelo agente EV para o agente de local da área, que calcula os horários ideais de carregamento dos veículos com base nas informações recebidas do agente EV e do agente coordenador. O agente coordenador age como um intermediário entre os agentes da área local e o agente do DSO durante a operação normal. Em cada período de agendamento, o agente coordenador recebe dos agentes locais de área a procura agregada dos veículos e os seus fatores restritivos para o período operacional seguinte. O agente DSO envia diariamente a matriz de limites da rede ao agente coordenador, e em cada período de gestão estima a procura total proveniente de EVs para o próximo período operacional e informa o agente coordenador se os pontos de agendamento são válidos ou se novos pontos de agendamento precisam ser calculados.

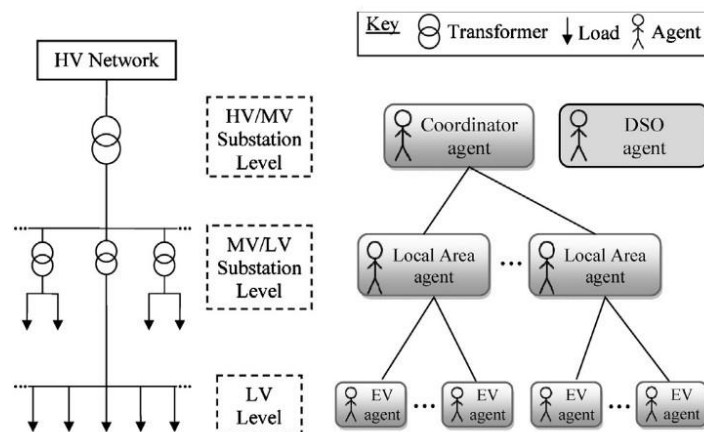


Fig. 2.9 – Sistema multiagente descrito em [52].

No mesmo livro [24], Z. Hu et al. propõem uma estratégia de carregamentos coordenados hierárquica no capítulo 3. Esta estratégia é escalável para considerar vários tipos de veículos e infraestruturas de carregamento e capaz de coordenar grandes escalas de veículos em tempo real. Duas abordagens são propostas, primeiro, uma abordagem de dois níveis é proposta onde

cada comunidade tem um agregador com múltiplos pontos de carregamento e, em seguida uma abordagem com três níveis onde também são considerados os operadores da rede de transporte. Tanto a carga base como as cargas de carregamento dos veículos são alimentadas pelo transformador de distribuição local. Este agregador funciona de maneira semelhante aos anteriormente apresentados, controlando tanto os estados ligado e desligado dos veículos bem como as potências de carga. Considera-se que os agregadores sob o mesmo transformador primário de distribuição não são necessariamente operados pela mesma empresa, significando que o agregador não pode revelar informações detalhadas dos requisitos dos seus clientes. Considera-se também que, quando um veículo se conecta com o agregador, informa instantaneamente o agregador do seu estado de carga e capacidade da bateria. Cada agregador também prevê as cargas base locais do dia seguinte, com base em dados históricos. As previsões também são implementadas no operador do sistema de distribuição onde as cargas base ao nível da distribuição também são previstas. Com estas informações, cada agendamento de carregamento do veículo é determinado dinamicamente.

Uma estrutura de três níveis também é fornecida no mesmo capítulo como mostra a Fig. 2.10. A principal diferença é a inclusão de um Operador da Rede de Transporte. Essa estratégia considera o facto de que, quando uma grande quantidade de veículos elétricos se integra nas redes de energia, as suas flexibilidades de carga podem ser exploradas ao nível do transporte. Esta estrutura de controlo hierárquico inclui três níveis, nomeadamente: controlo ao nível de transmissão, controlo ao nível da distribuição e controlo ao nível da estação de carregamento. Assume-se que os dados de operação do sistema podem ser comunicados diretamente entre o operador do nível de transmissão e o operador do nível de distribuição. No nível do transporte o consumo do carregamento agregado do dia seguinte é previsto, e uma curva de carga de carregamento é definida para cada operador de distribuição. Esta curva de carregamento considera o objetivo de minimizar o pico de carga do sistema, a flutuação de carga e os custos totais de carregamento, respeitando também a flexibilidade agregada de cada sistema de distribuição. O sistema de distribuição aloca dinamicamente a energia de carregamento para cada estação com base nas informações do dia anterior do operador de transporte e as necessidades de carregamento agregadas em tempo real das estações de carregamento. Os operadores de estação de carregamento funcionam de maneira semelhante aos agregadores na estrutura de dois níveis. Os resultados mostram melhorias em ambas as estruturas, no entanto, o sistema de três níveis foi capaz de alcançar tanto menor custo de carregamento como menor pico de carga.

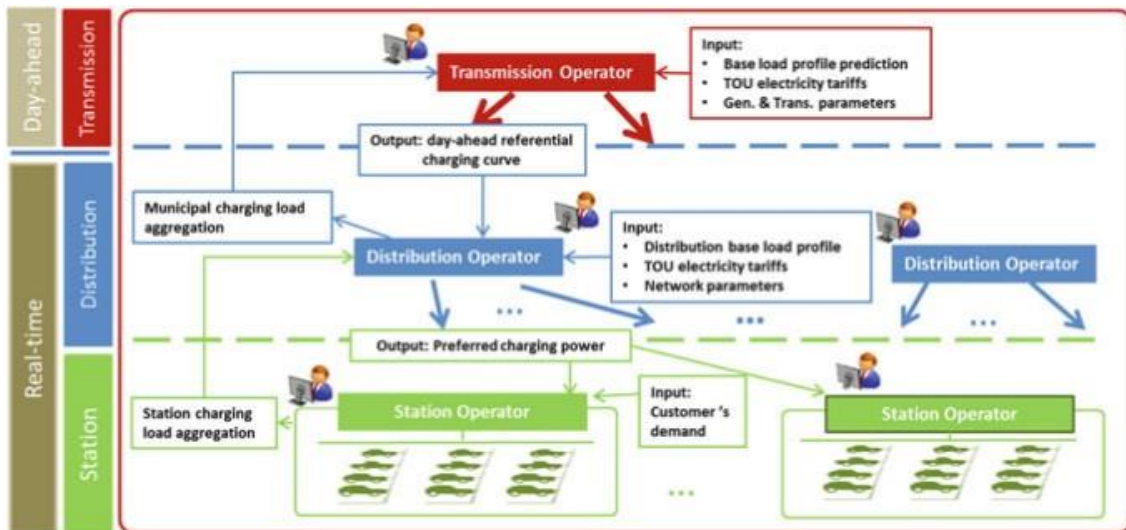


Fig. 2.10 – Estrutura hierárquica de três níveis para carregamento coordenado [24].

Embora não seja este o foco, a maioria das soluções apresentadas também contribui para reduzir o valor do pico de carga na rede. Considerando soluções cujo o foco é a redução do pico de carga, E. Xydas et al. no capítulo 5 de [24] concentram-se na importância da previsão da carga dos veículos elétricos ao coordenar os agendamentos dos carregamentos. O algoritmo de controlo proposto baseia-se na estrutura de uma rede de distribuição de baixa tensão genérica do Reino Unido. O agregador de veículos está localizado no nível da média tensão enquanto os agentes de EV estão dispersos nos carregadores de baixa tensão. O papel do agregador de veículos é recolher os dados do histórico de carregamento da frota e aplicar algoritmos de *machine learning* para fornecer previsões do consumo do carregamento futuro. O processo de previsão utiliza *Support Vector Machines* e é executado pelo agregador para melhorar a eficácia do algoritmo. Os veículos elétricos são coordenados para alcançar um efeito local de preenchimento de vales na curva de consumo do carregador de baixa tensão ao qual eles estão conectados. Inicialmente, o modelo de previsão é atualizado com os dados de carregamento do dia anterior e fornece a procura de carregamento prevista com dois dias de antecedência. Assim que o resultado do modelo de previsão e os dados relevantes do DSO estiverem disponíveis para o agregador, este calcula a capacidade da rede para a procura de carregamento dos veículos com base na procura prevista. Como o objetivo do modelo de controlo é produzir um efeito de preenchimento de vale na procura do carregador de baixa tensão e cada conjunto de veículos está associado a um carregador específico, todos os veículos no mesmo conjunto recebem os mesmos sinais de controlo. Com base nestes sinais cada veículo define o seu próprio horário de carregamento selecionando quando carregar. Os resultados mostram que quando a opção de previsão de carga é ativada, os veículos elétricos adaptam o seu carregamento para

reduzir o impacto dos veículos não controlados na curva de consumo resultando em menores valores de pico.

Reddy et al. usam um *Water Filling Algorithm* (WFA) para alcançar cargas planas na rede de distribuição em [53]. Para isso, dividem o dia inteiro em intervalos de tempo uniformes (15 minutos cada). As zonas que necessitam achatamento de carga são identificadas utilizando uma previsão da procura. A capacidade de armazenamento disponível dos PEV é estimada utilizando um modelo de mobilidade de PEV e a distribuição otimizada da energia para o dia seguinte é obtida através da utilização do WFA. A energia agregada disponível no início de cada zona é considerada como a principal restrição e a potência disponível dos PEV é tomada como restrição de potência para cada intervalo de tempo. Como as previsões podem não ser totalmente precisas, são necessários ajustes em tempo real. É aqui que os autores utilizam ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) para ajudar no agendamento. O ANFIS é utilizado para diminuir a complexidade na tomada de decisão, pois os autores consideram cinco parâmetros como variáveis de decisão no procedimento de priorização, nomeadamente: (i) capacidade da bateria; (ii) estado da carga; (iii) flexibilidade; (iv) o preço da energia; e (v) o custo de carga. Quando aplicado a um agregador numa rede de distribuição residencial, o ANFIS é capaz de realizar ambas as tarefas de nivelamento de carga e de regulação de tensão. Ao mesmo tempo o custo de carregamento é minimizado, satisfazendo assim o cliente.

Karfopoulos et al. em [54] introduz uma coordenação de EVs distribuída para otimizar o seguimento de um cronograma de energia. Este trabalho é baseado no algoritmo criado por Gan et al. em [55] que foi desenvolvido para seguir um determinado perfil de carga considerando apenas fluxo de energia unidirecional (carregamento). Karfopoulos et al. vão um passo adiante estendendo o método para considerar fluxos de energia bidirecionais. Como os autores consideram o problema um problema de programação não linear de inteiros mista, é implementado o método de Decomposição de Bender para definir a resposta ideal de cada EV aos sinais de controlo do agregador. A estratégia de gestão do agregador de EV proposta é transformada num controlo de coordenação iterativo semelhantemente ao de [55]. Em cada iteração, o agregador de EVs gera um conjunto de sinais de controlo, determinando a operação de carga e descarga da frota de EVs, que reflete o desvio entre o perfil agregado de carga/descarga dos EVs e o cronograma de energia do dia seguinte. Neste mecanismo de coordenação, o conjunto de pontos operacionais ótimos dos EVs é uma decisão local definida pelo utilizador. Isto significa que os próprios utilizadores definem a sua agenda de viagens com base nas suas necessidades e horário de trabalho e escolhem o seu perfil de carregamento ideal com base no sinal do agregador. Ao considerar os resultados, um novo padrão surgiu, não apenas os períodos de carregamento foram transferidos para períodos de preço mais baixos, mas também durante períodos com preço de energia elevados, as baterias dos EVs injetam

energia na rede. Esta arbitragem entre carga e descarga entre períodos de tarifa baixa e elevada permitem ao agregador ter lucros.

Em [56], os EVs são usados como forma de fornecer serviços auxiliares de controlo de frequência primária, o que é possível já que Wang et al. considerou os EVs como sistemas de armazenamento responsivos e móveis. O seu trabalho consiste numa estratégia baseado em consenso de dois níveis: o controlo do nível superior visa controlar os desvios de regulação de frequência distribuindo os comandos de energia por diferentes áreas de controlo, e o nível inferior coordena as cargas e descargas para minimizar os custos de regulação e a degradação da bateria. Uma vez que o seu trabalho recorre a funções de custos incrementados baseados em cada objetivo, não há necessidade de resolver a função objetivo. O ponto de controlo ótimo pode ser alcançado através do consenso de custos incrementais entre vizinhos agregados. Os resultados mostram utilizando 10 PEVs que este método consegue reduzir desvios de frequência tão altos quanto 0,01 Hz em um quarto do tempo do método tradicional.

Outro objetivo relacionado com o comportamento da rede é a regulação da tensão. Wang et al. em [57] considera o problema de quedas de tensão causado pelo carregamento de EVs. O aumento da penetração de PV pode levar a grandes quantidades de energia injetadas na rede, o que pode resultar num aumento significativo de tensão ao longo da rede de distribuição, já o carregamento simultâneo de EVs causa o efeito inverso, resultando numa queda de tensão. Nos seus trabalhos, Wang et al. concentram-se no desenvolvimento de um esquema de controlo coordenado para o carregamento de EVs para lidar com os problemas de tensão causados pelas elevadas penetrações de PV e EV em redes de distribuição em baixa tensão. Para tal, é desenvolvido um esquema de controlo de coordenação de dois níveis, onde o nível mais alto foca-se em medir as tensões de determinados barramentos e envia os sinais de controlo de acordo com o objetivo desejado, e os níveis inferiores determinam a quantidade da potência ativa e reativa a ser fornecida por cada carregador EV de forma a ser atingido o objetivo. Estes autores ainda consideram as características de carregamento e descarregamento das baterias dos EVs e os modelos que o representam. É de notar ainda que, quando disponíveis, os carregadores EV priorizam o uso da potência ativa, e se o EV estiver totalmente carregado, descarregado ou indisponível, ele utiliza a potência reativa para atingir o objetivo. Ainda assim, este método não substitui os métodos tradicionais de troca de mudança de tomadas do transformador e os condensadores comutados.

## 2.4 Discussão

Como descrito no capítulo anterior, muitos autores implementam estratégias de DSM utilizando veículos elétricos. Embora todos os autores concordem na utilização da flexibilidade energética do veículo para achatar cargas ou maximizar os lucros, nem todos a quantificam ou propõem uma função que a represente. Os autores que a quantificam, também não a especificam exclusivamente para veículos, sendo assim necessário um método que permita avaliar a flexibilidade energética e que seja geral o suficiente para ser usado na maioria das estratégias de DSM, mas específico para os veículos elétricos.

Considerando ainda as perspectivas dos diversos autores acima mencionados, verifica-se que a flexibilidade energética é avaliada de várias formas diferentes, onde cada autor tem uma maneira de a avaliar, embora o conceito base permaneça o mesmo: capacidade de um sistema energético mudar a sua geração ou consumo de energia em resposta a um estímulo ou função objetivo.

Nesta dissertação, a definição de flexibilidade utilizada será semelhante às apresentadas por D'hulst et al. em [17], Oldewurtel et al. em [19] e Rui Lopes em [58]. A flexibilidade energética será assim definida como a quantidade de energia que é necessário mover em cada instante de tempo, a fim de alcançar o perfil de carga desejado. Tendo em conta os objetivos específicos a serem atingidos e as necessidades de conforto do utilizador.

Tendo em conta que cada veículo tem vários perfis de carga possíveis, e que estes dependem do (i) tempo de chegada  $t_i$ , (ii) tempo de partida  $t_0$ , (iii) tempo para começar a carregar  $t_r$  e (iv) potência de carga  $P_c$ , recorrendo à definição descrita é possível responder a todas as necessidades.

Embora cada veículo tenha apenas um horário de chegada e partida, existem muitas combinações possíveis para os tempos de início do carregamento e potência de carregamento. É importante notar que estas combinações apenas são válidas se o objetivo definido pelo utilizador for atingido, e.g. a carga da bateria completa ou carga suficiente para percorrer uma determinada distância.

Do ponto de vista da gestão os veículos elétricos podem ser considerados dispositivos de consumo controlado. Se a cada veículo for associado um valor  $t_r$  que corresponde ao instante onde é iniciado o carregamento é possível determinar o perfil de consumo do veículo. Existem infinitos valores de  $t_r$  compreendidos entre o instante de chegada do veículo e o instante de saída. Se a cada instante  $t_r$  associar-se um perfil de consumo é possível determinar todos os perfis possíveis de um veículo. Um caso especial é quando  $t_r$  é igual a  $t_i$ , o perfil associado corresponde ao perfil base, o que é esperado, já que com o carregamento não controlado, o EV começa a carregar assim que estiver conectado ao carregador. Em todos os outros casos temos

perfis chamados de perfis modificados. Ao escolher-se o perfil que cumpre melhor as condições de controlo desejadas, é possível também determinar o  $t_{\tau}$  correspondente a este perfil. A flexibilidade energética utilizada para obter um perfil modificado qualquer pode ser calculada através da diferença entre o perfil base e o perfil modificado em análise. Se forem considerados múltiplos veículos a soma dos perfis de flexibilidade dá o perfil de flexibilidade agregada utilizada do sistema. Quando se trata de gestão do lado da procura, este método também é apropriado, uma vez que as únicas variáveis que diferenciam dois perfis de carga do mesmo EV são a potência de carregamento e o tempo de início do carregamento  $t_{\tau}$ . Isto significa que as estratégias de gestão apenas necessitam de se concentrar nas combinações ideais de  $t_{\tau}$  e  $P_c$  para a função objetivo. Assim este trabalho visa contribuir com métodos que possibilitam a gestão de carregamento de EVs através da utilização da flexibilidade disponibilizada pelos mesmos.

### 3. Metodologia

Como descrito nas secções anteriores, esta dissertação apresenta duas metodologias. A primeira diz respeito à simulação do carregamento de EVs e à avaliação dos respetivos impactos no perfil de carga de um edifício. A segunda metodologia foca a gestão do carregamento dos EVs que se divide em duas partes principais, nomeadamente, a gestão singular do carregamento de EVs e a gestão múltipla destes carregamentos. A referida gestão singular tem por objetivo encontrar o melhor horário de carregamento para um veículo a entrar no parque sem considerar o carregamento dos restantes EVs enquanto que a gestão múltipla encontra uma combinação de horários para o carregamento de todos os veículos que se encontram no parque, e que ainda não iniciaram o seu carregamento, sempre que há uma nova entrada.

#### 3.1 Avaliação de Impactos

Antes de realizar a gestão do carregamento dos EVs é necessário perceber quais os impactos causados pelo carregamento no consumo do edifício. De modo a ser possível avaliar estes impactos é necessário gerar o perfil de carga do edifício em conjunto com o perfil referente ao carregamento dos veículos. A metodologia a seguir descrita e, representada pelo diagrama de blocos apresentado na Fig. 3.1 realiza tanto a tarefa de gerar os perfis necessários como a de avaliar os impactos. Esta metodologia não é limitada temporalmente, isto é, e.g. a avaliação pode tanto ser realizada num horizonte temporal de uma semana como de um ano desde que os dados necessários para tal sejam disponibilizados.

Inicialmente é necessário determinar o número total de veículos a entrarem no parque de estacionamento, sendo o processo  $EV_{entradas}$  responsável por isso. Este processo recebe através da entrada  $Ent_{parque}$  todos os horários de entrada de veículos no parque e através de  $\%_{pen}$  a percentagem de penetração de veículos elétricos desejada. Considerando estas entradas, o processo seleciona aleatoriamente  $n$  horários de entrada correspondentes aos horários de entrada de veículos elétricos onde  $n$  é definido pela Equação 1. O valor de  $n$  é aproximado uma vez que a seleção de horários é aleatória. Todos os outros horários são considerados como entradas de veículos comuns sem necessidade de carregamento. Este processo (i.e.  $EV_{entradas}$ ) devolve  $Ent_{EV}$ , que diz respeito a um vetor que contém todos os horários de entradas de veículos elétricos e  $n$  que é o número total de EVs. O número total de veículos elétricos é utilizado no processo  $Distância_{EV}$ , que determina a distância percorrida por cada veículo elétrico. Estas distâncias são determinadas aleatoriamente através de uma distribuição de probabilidade modelada através dos dados de mobilidade presentes em

$Dados_{Mobilidade}$ . As distâncias percorridas  $EV_{Dist}$  e os horários  $Ent_{EV}$  são utilizados pelo processo  $Gerar_{EV}$  para gerar estruturas  $EV_{Gerados}$ , que definem os veículos elétricos que entram no parque. Este processo recebe também os modelos dos veículos a serem considerados através de  $Modelos_{EV}$ . A entrada  $Modelos_{EV}$  contém a capacidade máxima da bateria  $EV_{Bat}$ , o consumo energético por quilômetro  $EV_{Cons}$ , as possíveis potências de carregamento  $P_a$  e a proporção de cada veículo dentro do conjunto considerado. O processo  $Gerar_{EV}$ , cria as estruturas  $EV_{Gerados}$ , sendo que cada uma destas estruturas contém um horário de entrada, uma distância percorrida, um dos modelos de  $Modelos_{EV}$  consoante a distribuição dos mesmos, o estado de carga  $EDC$  do veículo no momento de entrada e a potência de carregamento do veículo  $P_c$ . É considerado que a distância percorrida pelo veículo é a distância total desde o último carregamento. Deste modo é considerado que o veículo tem  $EDC$  inicial de 100% e conforme viaja gasta energia consoante o seu consumo específico. Com estas considerações o estado de carga  $EDC$  pode ser calculado através da Equação 2. Caso o valor de  $EDC$  seja negativo o veículo é considerado totalmente descarregado e  $EDC$  toma o valor de 0. Como a estrutura  $EV_{Gerados}$  caracteriza um veículo a entrar no parque, é possível utiliza-la como ponto de partida em uma aplicação real desta metodologia desde que os dados necessários sejam fornecidos. No caso de uma implementação real o valor da distância percorrida poderia não ser necessário e o  $EDC$  poderia ser indicado pelo utilizador. Esta metodologia permite escolher a potência de carregamento para cada cenário através da entrada  $P_c$ , (caso esta variável não seja especificada então escolhe-se uma potência do conjunto  $P_a$  aleatoriamente).

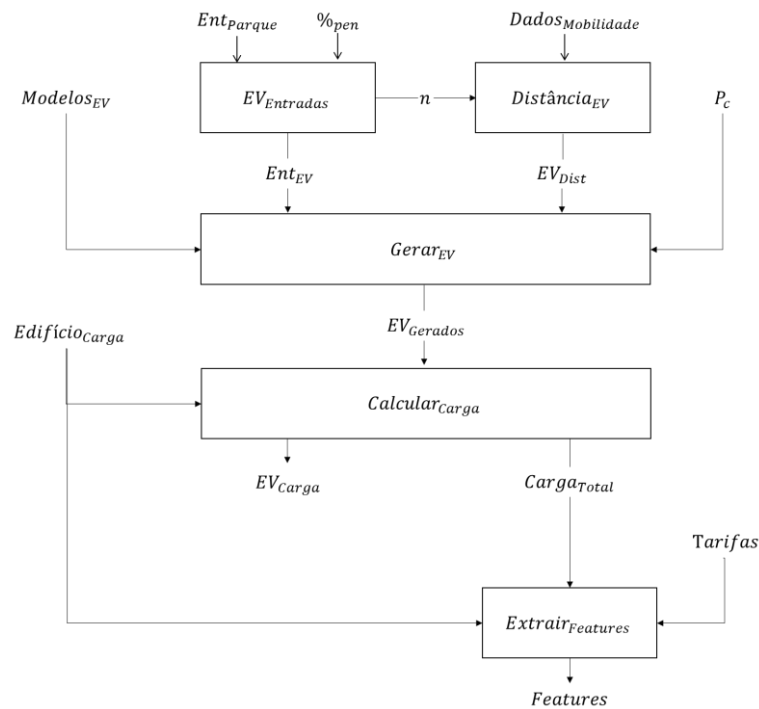


Fig. 3.1 – Diagrama de Blocos para Avaliação de Impactos do Carregamento

$$n \approx \%_{Pen} * Lenght(Ent_{Parque}) \quad 1$$

$$EDC = 1 - \frac{EV_{Dist} * EV_{Cons}}{EV_{Bat}} \quad 2$$

O processo  $Calcular_{Carga}$  recebe todos os veículos gerados  $EV_{Gerados}$  e constrói o diagrama de carga,  $EV_{Carga}$ , para cada veículo. Isto é realizado através da Equação 3 e Equação 4. A Equação 3 disponibiliza a duração do carregamento de cada veículo, sendo considerado que este carrega a uma potência  $P_c$  constante até atingir a carga completa. O diagrama é construído considerando que não há consumo antes da entrada do veículo,  $t_i$ , ou seja enquanto o veículo não entrar no parque e não for conectado ao carregador não há consumo de energia. O carregamento é iniciado no momento em que o veículo é conectado ao carregador. De modo a simplificar a metodologia, o consumo é assumido como constante e igual a  $P_c$  desde o momento de início de carregamento até o final do mesmo. O carregamento termina quando a duração  $t_c$  for ultrapassada, onde  $t_c$  corresponde à duração necessária do carregamento para atingir a capacidade máxima da bateria. Uma vez terminado o carregamento, o veículo pode permanecer indefinidamente no parque, mas já não existe consumo, voltando assim a potência nula até à saída do veículo do parque. Estas cargas são então adicionadas ao diagrama de carga do edifício resultando assim no diagrama de carga total  $Carga_{Total}$ .

$$t_c = \frac{(1 - EDC) * EV_{Bat}}{P_c} \quad 3$$

$$EV_{Carga}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_i \\ P_c, & t_i \leq t \leq t_i + t_c \\ 0, & t > t_i + t_c \end{cases} \quad 4$$

O processo  $Extrair_{Features}$  como o nome indica extrai vários indicadores do diagrama de carga. Este pode receber qualquer diagrama de carga, sendo que no caso da avaliação de impactos recebe a  $Carga_{Total}$ . Este processo analisa o diagrama de carga e extrai indicadores selecionados. Por exemplo, a potência de pico  $P_{max}$ , a potência média  $P_{med}$ , a *peak-to-average ratio*  $PTA$ (Equação 5) ou o consumo total  $C_{total}$ . Esta análise pode ter horizontes temporais menores ou iguais ao do digrama de carga em análise. Por exemplo, o diagrama em análise pode ter um horizonte de uma semana e só um dia dessa semana ser alvo de análise. Este processo pode também aceitar outra carga e comparar ambas. Neste caso a carga do edifício sem o carregamento de veículos também é recebida pelo processo. Assim este processo não só retorna os valores dos indicadores selecionados como também o fator de crescimento de cada um desses face ao diagrama de carga sem carregamentos. Também é possível analisar custos com este processo se a tarifa horária do edifício em análise for disponibilizada.

$$PTA = \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{m\acute{e}d}}$$

5

## 3.2 Gestão de Carregamentos

De modo a explorar a flexibilidade energética disponibilizada pelos veículos elétricos foi desenvolvida uma metodologia de gestão de carregamentos. Esta metodologia baseia-se em encontrar o melhor horário de início de carregamento para cada veículo. Esta permite seguir duas abordagens distintas, nomeadamente, uma gestão singular dos carregamentos de EVs ou uma gestão múltipla dos carregamentos. O objetivo da gestão singular é determinar o horário ideal de início de carregamento para um veículo a entrar no parque enquanto a gestão múltipla procura a melhor combinação de horários para todos os veículos elétricos que se encontram no parque e ainda não iniciaram os respectivos carregamentos.

### 3.2.1 Gestão Singular

No caso da gestão singular, o carregamento de cada EV é definido no instante em que o veículo entra no parque sem considerar os carregamentos dos restantes veículos elétricos que se encontram no parque e que ainda não iniciaram os respectivos carregamentos. Neste caso é considerado que o instante ótimo para o início de carregamento,  $t_r$ , é determinado no momento da entrada no parque não podendo ser posteriormente alterado pela gestão dos carregamentos.

Considerando a utilização prévia da metodologia apresentada na Secção 3.1, a gestão do carregamento tem como ponto de partida a estrutura  $EV_{Gerados}$ . Esta estrutura contém o horário de entrada de cada veículo,  $t_i$ , bem como o seu estado de carga  $EDC$ , potência de carregamento  $P_c$  e o indicador do modelo do carro. O horário de saída do veículo,  $t_o$ , é a soma do horário de entrada,  $t_i$ , com a estadia considerada. Esta gestão pode ser aplicada em ambientes reais se os dados necessários para popular a estrutura  $EV_{Gerados}$  forem fornecidos. De forma semelhante à metodologia anterior estes dados são utilizados para calcular a duração de carregamento do veículo,  $t_c$ , através da Equação 3. Caso a duração do carregamento seja maior ou igual à estadia do veículo, o carregamento em questão é assumido como não modificável e é considerado o perfil de carga base para esse veículo, ou seja, o veículo mantém como horário de início de carregamento o instante de entrada no parque (i.e. neste caso não existe flexibilidade energética). Por outro lado, caso o carregamento do veículo possa ser modificado então é utilizado um algoritmo para decidir o melhor instante para o início do carregamento. A função de otimização considera todos os valores possíveis de 1 até  $t_l$  de atraso para o início do carregamento. O valor  $t_l$  é dado pela Equação 6 e corresponde ao atraso máximo em que ainda é possível atingir carga completa no final do carregamento. Para cada valor de atraso é calculado

o novo diagrama de carga do veículo e este é adicionado à previsão da carga do edifício, sendo que esta previsão inclui a carga do edifício e de todos os veículos que previamente entraram no parque. O novo diagrama de carga é igual ao diagrama de carga não otimizado, porém atrasado. Um exemplo ilustrativo é apresentado na Fig. 3.2. Neste exemplo foram considerados 5 veículos com entrada às 10:00 horas, com uma estadia de 12 horas e durações de carregamento variáveis de acordo com o *EDC* de cada veículo. É então utilizada uma função para calcular um valor de custo para cada valor de atraso e a função de otimização escolhe o valor de atraso que tem o menor custo. Neste caso a função de custo é o valor máximo da potência dentro do período de estadia do veículo. Foi considerado o valor máximo de potência já que por vezes as instalações podem não estar preparadas para cargas tão elevadas. Este procedimento é repetido sempre que um novo veículo elétrico entra no parque. O fluxograma que descreve esta gestão singular de carregamentos é apresentado na Fig. 3.3. No momento de entrada do veículo é determinado o seu  $t_c$  e perfil de carga  $EV_{carga}$  através das Equações 3 e 4 de maneira semelhante à metodologia anterior. Os dados  $t_l, t_i, t_o, t_c, EV_{carga}$  e a previsão de consumo do edifício *Previsão* também são fornecidos à função de otimização. Inicialmente é escolhido o valor 1 para  $t_s$ , onde um valor de 1 significa que o veículo iniciará o carregamento no instante seguinte enquanto que 0 significa iniciar o carregamento imediatamente, porém este valor é impossível já que a função de otimização não é instantânea. Em seguida o valor de  $t_s$  é incrementado em uma unidade até a um máximo  $t_l$ . Para cada valor de  $t_s$  é calculado o novo diagrama de carga e o custo associado. Caso o custo do novo valor de  $t_s$  seja menor que o menor custo anterior, o novo valor de  $t_s$  é assumido como o valor ótimo. Esta gestão gera uma subotimização dos horários de carregamento uma vez que cada veículo tem o seu horário otimizado individualmente, mas não é considerada a melhor combinação dos horários.

$$t_l = t_o - t_i - t_c$$

6

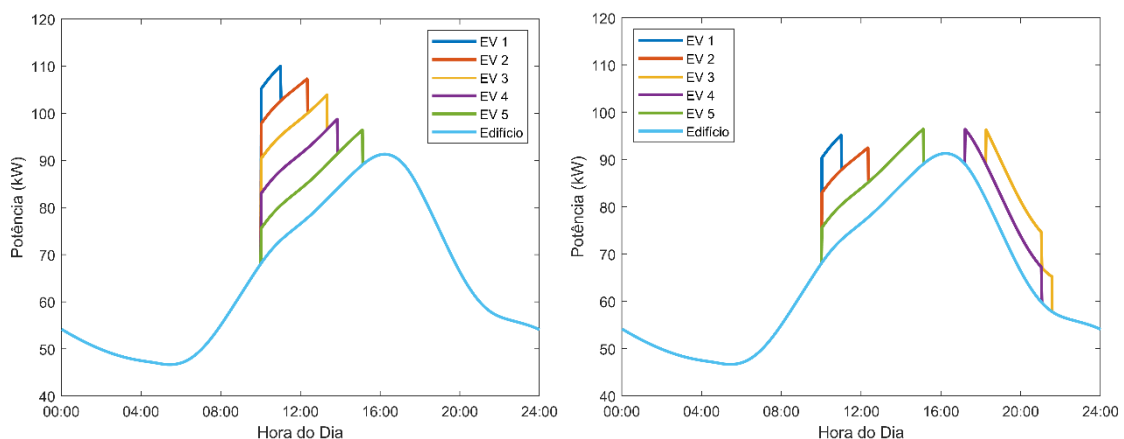


Fig. 3.2 – Comparação entre o diagrama de carga não otimizado(esquerda) e otimizado(direita) de um veículo.

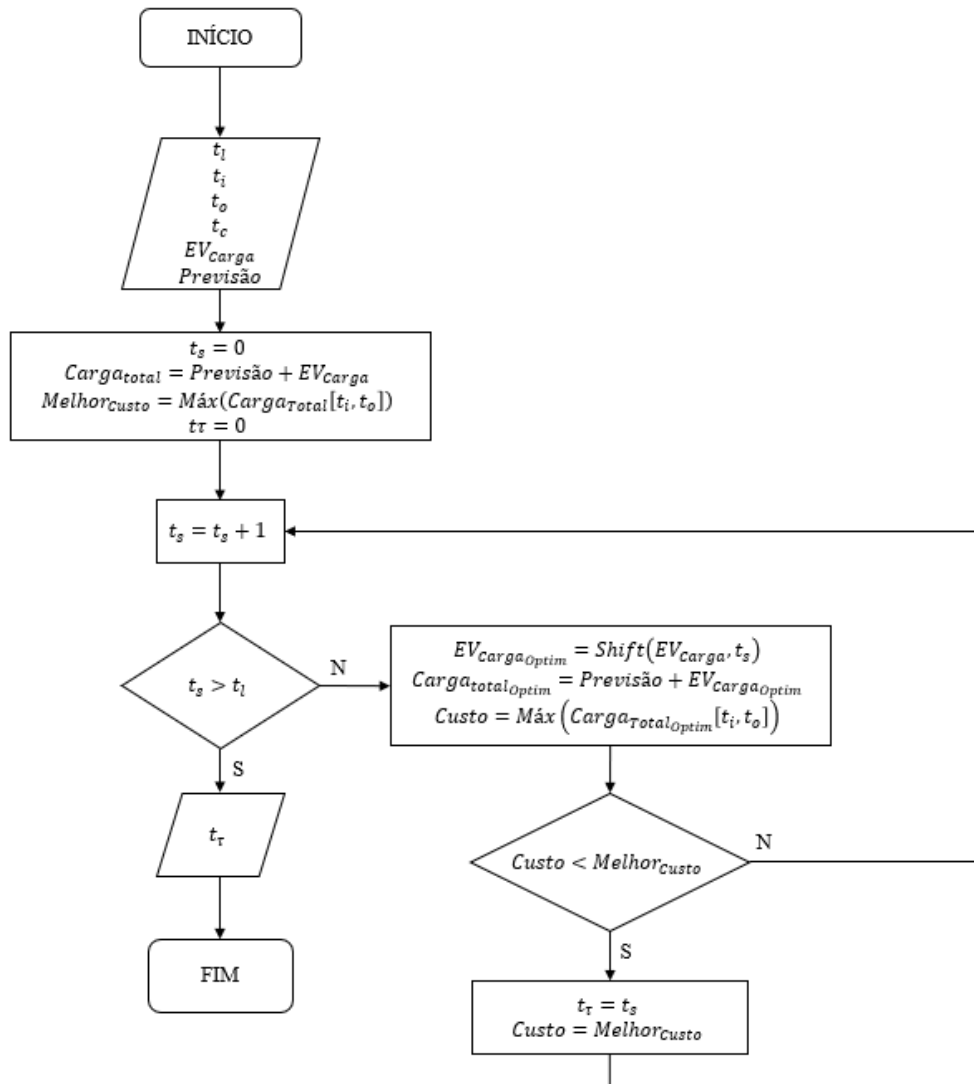


Fig. 3.3 – Fluxograma da Função de Otimização singular

### 3.2.2 Gestão de Carregamento Múltipla

Apesar da gestão singular produzir uma otimização para cada veículo, não produz uma otimização global. De modo a aproveitar-se ao máximo a flexibilidade energética disponibilizada pelos EVs é necessário realizar uma otimização global que considere as várias combinações entre os carregamentos dos veículos. Apesar de vários métodos de otimização serem viáveis os algoritmos genéticos foram selecionados graças à sua simples de implementação nesta metodologia.

Os algoritmos genéticos são uma técnica utilizada em problemas de otimização e busca que gera soluções aproximadas. Esta técnica baseia-se no princípio Darwiniano de reprodução e seleção natural. John Holland foi pioneiro ao descrever em [59] como processos análogos à

evolução podem ser aplicados à resolução de problemas matemáticos e de otimização em engenharia [60]. Os algoritmos genéticos descobrem soluções para o problema em questão através dos seguintes passos:

1. Gerar população inicial.
2. Avaliar a população e gerar nova população.
3. Escolher melhor indivíduo na população final.

Na perspectiva dos algoritmos genéticos existe um grande número de soluções para o problema. Cada solução é chamada de indivíduo e ao conjunto de indivíduos uma população. Os indivíduos são compostos por genes e cada gene é uma pequena porção da solução. Nesta gestão de carregamento cada gene corresponde ao valor de atraso para o início do carregamento de um veículo. Um cenário com  $n$  veículos para otimizar terá indivíduos com  $n$  genes. A população inicial é gerada aleatoriamente e é avaliada através de uma função de *fitness*. Consoante o valor de *fitness* as soluções são escolhidas para gerar a população seguinte através das possíveis operações: (i) Elitismo, (ii) *Crossover* e (iii) Mutação. No Elitismo o indivíduo é copiado para a nova população. No caso do *Crossover* novos indivíduos são criados a partir da combinação de indivíduos já existentes. Este método é análogo à união de gametas na reprodução sexuada, neste caso porções dos indivíduos progenitores são combinadas para gerar novos indivíduos. No caso da mutação a solução é alterada através da alteração de uma parte da solução aleatoriamente. Estes passos são repetidos até que uma condição de paragem seja atendida. A condição de paragem pode ser: número máximo de gerações, variação de *fitness* menor que a tolerada, valor de *fitness* desejado atingido, entre outras.

De forma semelhante ao que é feito na otimização singular, na otimização múltipla sempre que um veículo entra no parque a função de otimização é chamada. Neste caso não será otimizado apenas o veículo a entrar, mas sim todos os veículos elétricos disponíveis no parque. Um veículo é considerado disponível se está no parque e ainda não iniciou o seu carregamento, isto é feito para reduzir o número de vezes que o veículo é ligado e desligado do carregador aumentando assim a vida útil da bateria [61]. No momento em que um veículo entra no parque é estimada a duração do seu carregamento (tal como no caso da otimização singular é utilizada a Equação 3). No caso de a duração ser maior do que a estadia, o veículo inicia o carregamento imediatamente. Neste cenário o *EDC* não será 100% no instante de saída do veículo. Caso o veículo possa ser otimizado é adicionado a uma lista de veículos disponíveis  $Parque_{EVS}$ . A partir desta lista é criada a estrutura do cromossoma a ser utilizado pelo algoritmo genético, em que cada gene corresponde ao atraso de cada veículo para obter o cenário ótimo. O algoritmo recebe também uma lista  $t_L$  com todos os valores de atraso limite para cada veículo. A função de *fitness* do algoritmo genético é semelhante à função de custo da otimização singular. Esta função, no entanto, permite considerar o deslocamento independente de várias cargas. O algoritmo genético é utilizado nesta etapa para otimizar os atrasos de modo a obter o menor valor de *fitness* possível. Neste caso a função de *fitness* não devolverá o valor máximo de potência entre o instante atual

e o instante da saída do veículo a entrar, mas sim o valor máximo entre o instante atual e o instante de saída do veículo com maior permanência no parque. Um exemplo de uma simulação e de uma comparação entre a performance de vários cromossomas de uma população com 5 carros é apresentada nas figuras Fig. 3.4, Fig. 3.5 e Fig. 3.6. Neste exemplo foram considerados 5 carros com entrada às 10:00 horas, tempos de carregamento variados e uma estadia de 12 horas.

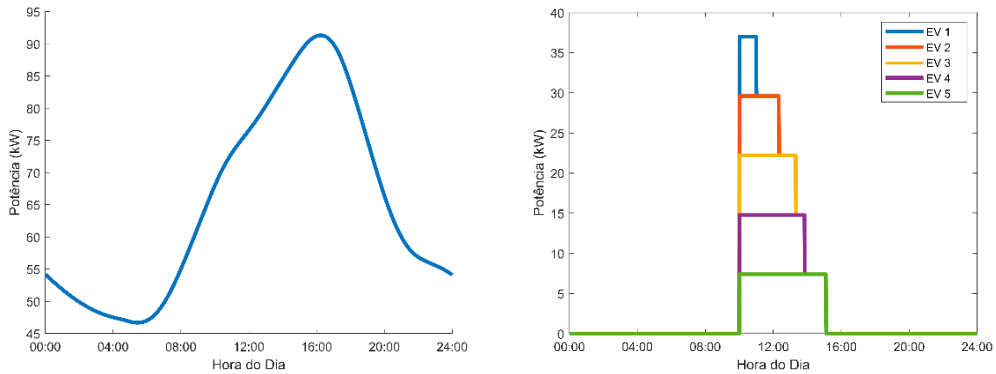


Fig. 3.4 – Diagramas de Carga do edifício (esquerda) e dos EVs não otimizados (direita).

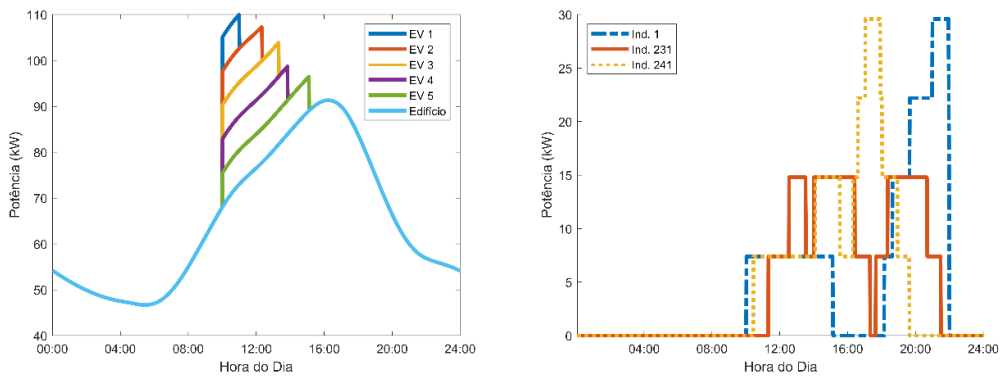


Fig. 3.5 – Diagramas de carga total não otimizado (esquerda) e de combinações de horários de carregamento (direita).

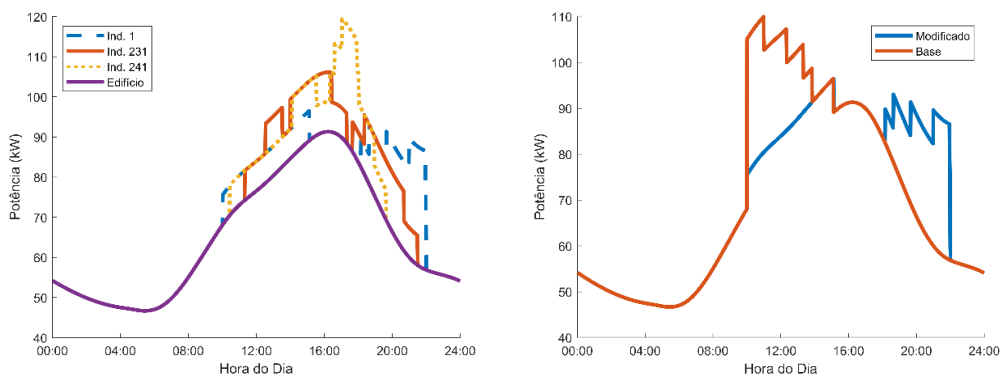


Fig. 3.6 – Comparação entre três combinações de horário (esquerda) e entre o cenário base e o otimizado (direita).

Os indivíduos são soluções da população final do algoritmo genético gerada neste exemplo. Como se pode ver pelas Fig. 3.5 e 3.6 o algoritmo seleciona o indivíduo que produz o menor pico quando somado ao edifício. Apesar de o indivíduo 231 possuir uma combinação que produz um menor valor de pico na imagem Fig. 3.5, quando se considera a carga do edifício, o indivíduo 1 tem melhor performance.



## 4. Resultados

Neste capítulo é apresentado o caso de estudo bem como os resultados da aplicação de ambas as metodologias no mesmo. Todo o processamento de dados foi realizado através da utilização do software MATLAB (Mathworks Inc, 2019). A secção 4.1 diz respeito à descrição do caso de estudo, a secção 4.2 à avaliação dos impactos e a secção 4.3 à gestão do carregamento

### 4.1 Caso de Estudo

Ambas as metodologias foram aplicadas a um caso de estudo centrado na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. As subsecções seguintes descrevem os dados utilizados em cada uma das entradas das metodologias apresentadas, nomeadamente,  $Ent_{Parque}$ ,  $Dados_{Mobilidade}$ ,  $Modelos_{EV}$  e  $Edifício_{Carga}$  e o tratamento necessário para a utilização dos mesmos.

#### 4.1.1 Carga do Edifício

O caso de estudo aqui apresentado foca-se no edifício do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (DEEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-NOVA). A carga do edifício foi obtida através de medidas de um contador inteligente instalado no edifício presente na Fig. 4.1. As medidas utilizadas correspondem à semana de 30 de Setembro a 6 de Outubro de 2013. O DEEC foi fundado em 1993 e reside num edifício constituído por 3 andares e contém 21 laboratórios, 30 gabinetes de docentes, uma secretaria, 5 salas de investigação e mestrados, 5 espaços técnicos, um gabinete de seminários e uma sala de reuniões que é utilizada regularmente por docentes e estudantes [62]. O seu consumo é constituído sobretudo por iluminação, computadores pessoais, servidores e os computadores instalados nos laboratórios. No edifício existem também motores elétricos e bombas de água, embora com utilização não regular. Como este edifício é utilizado sobretudo para fins académicos, o seu diagrama de carga apresenta maior consumo durante os dias de semana, tal como apresentado na Fig. 4.2. Também é possível verificar uma redução do consumo às as quartas feiras, pois são dias com horário reduzido pelo que não existem tantas aulas, reduzindo assim a quantidade de utilizadores do departamento e consequentemente o seu consumo.



Fig. 4.1 – Edifício do DEEC da FCT-NOVA

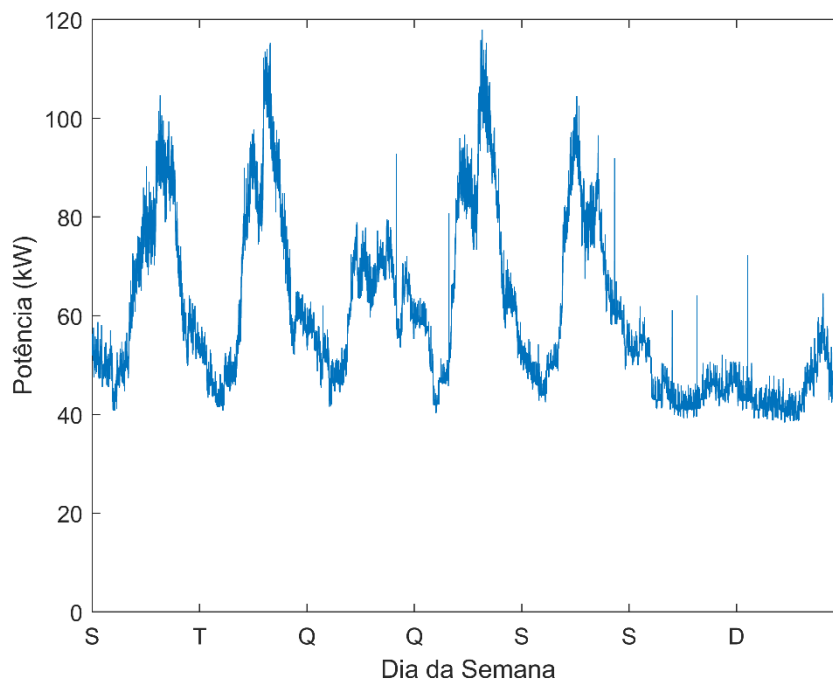


Fig. 4.2 – Diagrama de Carga Semanal do edifício

#### 4.1.2 Distâncias Percorridas

Como explicado na secção 3.1 uma das informações necessárias para simular o carregamento de um EV é o estado de carga do veículo. Este valor pode ser indicado pelo utilizador ou, como neste caso, calculado. Para calcular o estado de carga é necessário estimar a distância percorrida pelo EV. As distâncias são estimadas através de uma distribuição de probabilidade. Como fonte de dados foi utilizado o estudo presente em [63]. Neste estudo foram monitorizados 49 condutores, com idades compreendidas entre os 18 e os 66 anos de ambos os sexos que circulam habitualmente na região da Grande Lisboa. Os condutores foram

monitorizados de abril a setembro de 2010 em ciclos de monitorização com a duração de uma semana. A partir da Tabela 2.2 em [63] foram retiradas as distâncias percorridas semanalmente pelos condutores e foram calculadas as distâncias diárias. As distâncias diárias são apresentadas nesta dissertação na Tabela 2. Estas distâncias diárias são usadas para criar um histograma de 10 intervalos. A partir deste histograma é criada uma distribuição de probabilidade com a probabilidade de uma distância pertencer a determinado intervalo. Para cada veículo é calculado um número aleatório, sendo este número utilizado para determinar o intervalo de distancias possíveis para este veículo. Dentro desse intervalo é escolhido um valor aleatório para a distância do veículo. A comparação entre a distribuição de probabilidade dos valores originais e dos valores gerados para 1500 veículos é apresentada na Fig. 4.3.

*Tabela 2 – Distâncias diárias consideradas a partir de [63].*

| Condutor | Distância (km) | Condutor | Distância (km) | Condutor | Distância (km) | Condutor | Distância (km) | Condutor | Distância (km) |
|----------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|
| 1        | 30,0           | 11       | 64,4           | 21       | 77,5           | 31       | 85,8           | 41       | 167,4          |
| 2        | 6,3            | 12       | 114,0          | 22       | 45,9           | 32       | 76,5           | 42       | 26,2           |
| 3        | 65,9           | 13       | 79,1           | 23       | 14,3           | 33       | 30,6           | 43       | 28,8           |
| 4        | 96,4           | 14       | 14,5           | 24       | 51,7           | 34       | 36,8           | 44       | 89,1           |
| 5        | 76,2           | 15       | 105,6          | 25       | 226,2          | 35       | 63,7           | 45       | 11,0           |
| 6        | 89,6           | 16       | 70,3           | 26       | 44,4           | 36       | 138,0          | 46       | 68,6           |
| 7        | 107,5          | 17       | 135,5          | 27       | 101,4          | 37       | 78,5           | 47       | 266,3          |
| 8        | 43,8           | 18       | 207,7          | 28       | 83,6           | 38       | 136,1          | 48       | 51,7           |
| 9        | 60,2           | 19       | 32,8           | 29       | 42,6           | 39       | 72,0           | 49       | 70,9           |
| 10       | 78,4           | 20       | 27,9           | 30       | 35,1           | 40       | 17,0           |          |                |

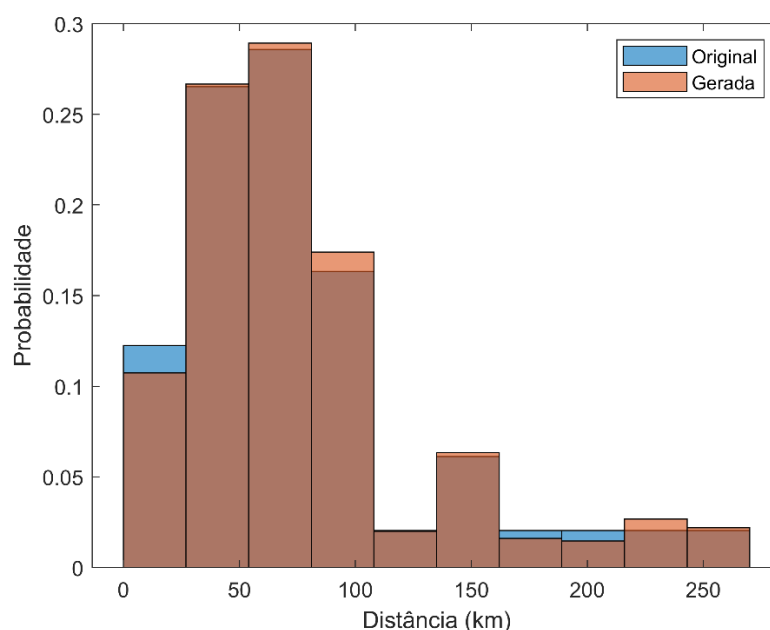


Fig. 4.3 – Comparação entre a probabilidade da amostra original e da gerada.

### 4.1.3 Entradas no Parque

As entradas dos veículos elétricos foram obtidas através de dados fornecidos pela divisão de segurança da FCT-NOVA. As portarias da FCT-NOVA (Fig. 4.4) estão equipadas com cancelas automáticas que abrem com a apresentação de um cartão de acesso, sendo que todos os docentes, estudantes e funcionários da FCT-NOVA possuem um cartão. Sempre que um veículo entra na FCT-NOVA, o sistema de segurança regista várias informações sobre o utilizador. Para este caso de estudo as informações pertinentes são as seguintes: o horário, o departamento a que os utilizadores pertencem e em qual portaria foi realizado o acesso. Como o edifício considerado no caso de estudo foi o DEEC, foi escolhido como parque de estacionamento o parque existente imediatamente a sul do DEEC. O mapa com a localização do DEEC e do parque é apresentado na Fig. 4.5. A divisão de segurança forneceu os dados de entrada no parque escolhido e foram selecionadas as entradas de utilizadores pertencentes ao DEEC. Os dados fornecidos correspondem à semana de 30 de setembro a 6 de outubro de 2013 para coincidir com a semana de monitorização do consumo de energia elétrica do edifício. As datas foram convertidas para minutos desde as 00:00 do dia 30 de setembro. É de salientar que durante os fins de semana o parque escolhido é encerrado, não havendo assim entradas de veículos no mesmo e conseqüentemente carregamento de EVs. Ao todo numa semana foram registadas 1322 entradas no parque. Como as informações disponibilizadas não permitiam fazer uma correspondência entre a entrada e a saída do veículo, neste estudo foram consideradas estadias de 4, 8, e 12 horas para a gestão do carregamento. A Fig. 4.6 apresenta a ocupação do parque com as estadias consideradas no caso de estudo. É possível verificar uma menor ocupação às quartas-feiras, o que vai de encontro à Fig. 4.2 onde é possível verificar um menor

consumo nesse dia. Na semana analisada a quarta-feira teve 216 entradas enquanto os outros dias tiveram em média 277.



Fig. 4.4 – Portaria principal da FCT-NOVA com as cancelas automáticas [64].



Fig. 4.5 – Mapa com o parque de estacionamento (azul) e o DEEC (vermelho) realçados [65].

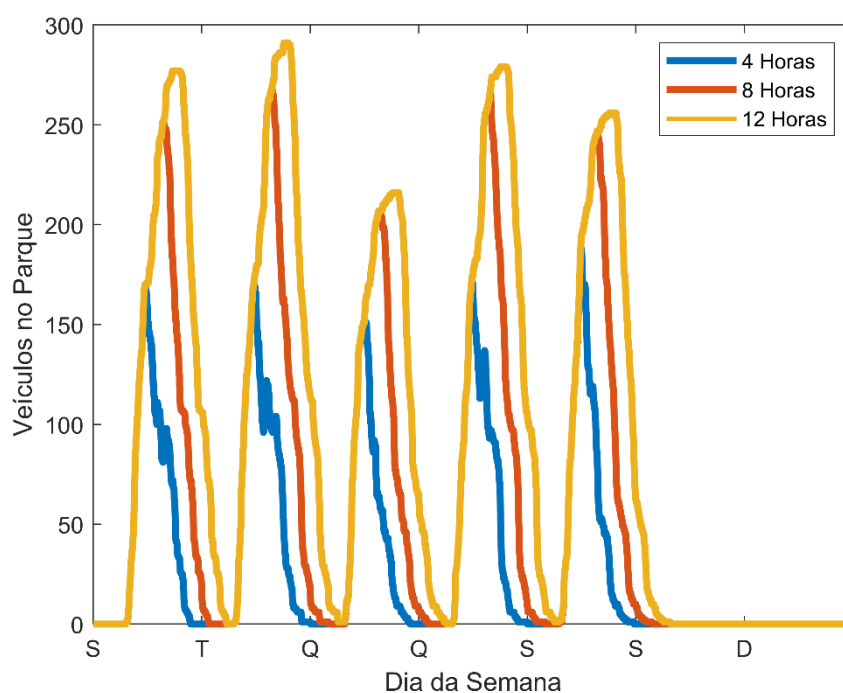


Fig. 4.6 – Diagrama de ocupação do parque considerado com estadias variáveis de 4, 8 e 12 horas.

#### 4.1.4 Características dos Veículos

Por último é necessário definir quais os modelos de veículos a serem considerados no caso de estudo. É necessário definir o consumo específico por quilómetro, a capacidade da bateria, as possíveis potências de carregamento compatíveis com o veículo e a sua distribuição. Os modelos considerados são os mesmos considerados em [66], [67] e são apresentados na Tabela 3. As potências de carregamento são as fornecidas pelo relatório da [33] Agência Europeia do Ambiente. É considerado que todos os veículos possuem a mesma distribuição, pelo que o processo  $Gerar_{EV}$  escolhe aleatoriamente um dos quatro modelos disponíveis.

Tabela 3 – Modelos de veículos considerados no caso de estudo.

| Modelo          | Capacidade da Bateria (kWh) | Consumo Específico (Wh/km) | Potências Compatíveis (kW) |
|-----------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Miniveículo     | 17.7                        | 146                        | 3,7; 7,4; 10; 22           |
| Veículo Mediano | 24.4                        | 170                        |                            |
| Veículo Grande  | 42.1                        | 185                        |                            |
| Veículo de Luxo | 59.9                        | 207                        |                            |

## 4.2 Avaliação de Impactos

Inicialmente a metodologia de avaliação de impactos foi aplicada a 50 cenários. Cada cenário é definido por uma potência de carregamento e uma percentagem de penetração. As potências consideradas são as presentes na Tabela 3. Foram considerados cenários em que todos os veículos carregavam à mesma potência e também um conjunto de cenários com potências aleatórias de entre as consideradas. As percentagens de penetração variam entre 10% e 100%, com incrementos de 10%. A Fig. 4.7 apresenta a comparação entre os seguintes indicadores considerados para diferentes níveis de penetração de EVs: potência de pico  $P_{m\acute{a}x}$  e consumo total semanal  $C_{total}$ .

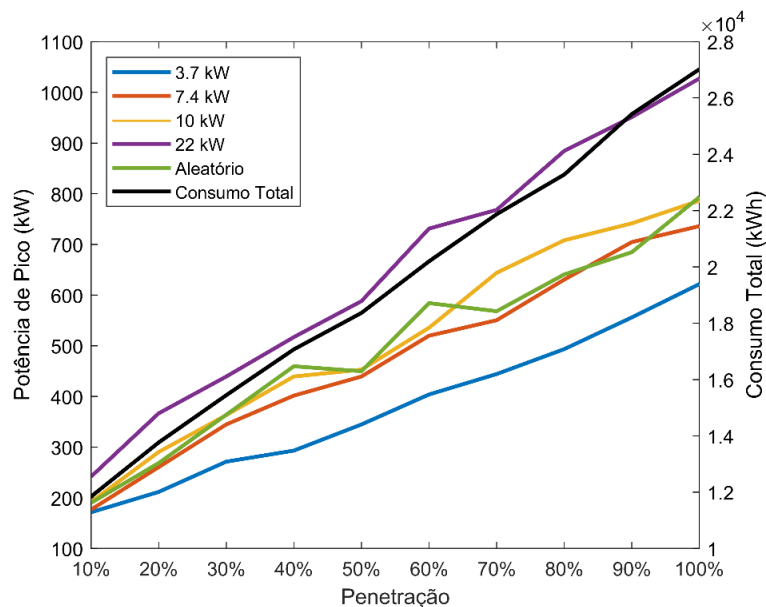


Fig. 4.7 – Potência de pico e consumo de energia total para diferentes potências de carregamento e níveis de penetração de EVs..

Como esperado o consumo total de energia em todos os cenários é independente da potência de carregamento escolhida. Quando é analisado o crescimento do consumo face ao número de veículos é possível verificar o seu aumento. O consumo total do edifício sem carregamento de EVs é de 10,07 MWh e com 100% de penetração de EVs é de 27,04 MWh. Uma penetração de EVs de 100% significa que todos os 1322 veículos que entram no parque semanalmente são EVs e necessitam carregamento, e o consumo médio apresenta um aumento de 268%. No entanto os impactos do carregamento são muito mais evidentes quando é considerada a potência de pico. Este impacto é importante já que uma elevada potência de pico em instalações pode causar e.g. sobrecargas nos transformadores de distribuição e um aumento no custo associado à potência contratada da instalação. Uma vez que o caso de estudo considerado é de uma universidade as entradas dos utilizadores no parque são, por norma, relativamente próximas. Isto faz com que grande parte dos carregamentos dos EVs seja

simultâneo, havendo assim um aumento repentino do consumo do edifício. Este acontecimento é claramente visível na Fig. 4.8 onde há um crescimento de 49,29 kW às 7:00h para 312,83 kW às 7:30h e para 901,5 kW às 9:30h da segunda-feira. Este crescimento é mais drástico em cenários onde a potência de carregamento é mais elevada. Porém nos cenários com potência de carregamento mais baixas apesar do valor máximo dos picos ser menor, a duração dos picos é maior já que os veículos permanecem mais tempo a carregar. Este crescimento é especialmente relevante já que cada vez mais são instalados carregadores com potências de carregamento mais elevadas. Ao considerar as atuais tarifas energéticas para instalações alimentadas a média tensão de 0,0508€/kW.dia, disponíveis em [68], a potência contratada sem EVs tem um custo de 5,99€ por dia. Se as mesmas tarifas forem aplicadas ao cenário com potência de carregamento de 3,7 kW e 20% de penetração este valor aumenta para 10,74€. Com 100% de penetração de EVs o valor diário seria 31,581€. Como verificado na Fig. 4.7 o cenário com 3.7 kW produz a menor potência de pico em todos cenários, caso o carregamento fosse realizado com 22kW ao invés de 3,7kW estes valores seriam 18,62€ e 52,18€, respectivamente. Isto mostra que a gestão do carregamento dos EVs é necessária não só para reduzir os picos de consumo, mas também os custos associados à potência contratada.

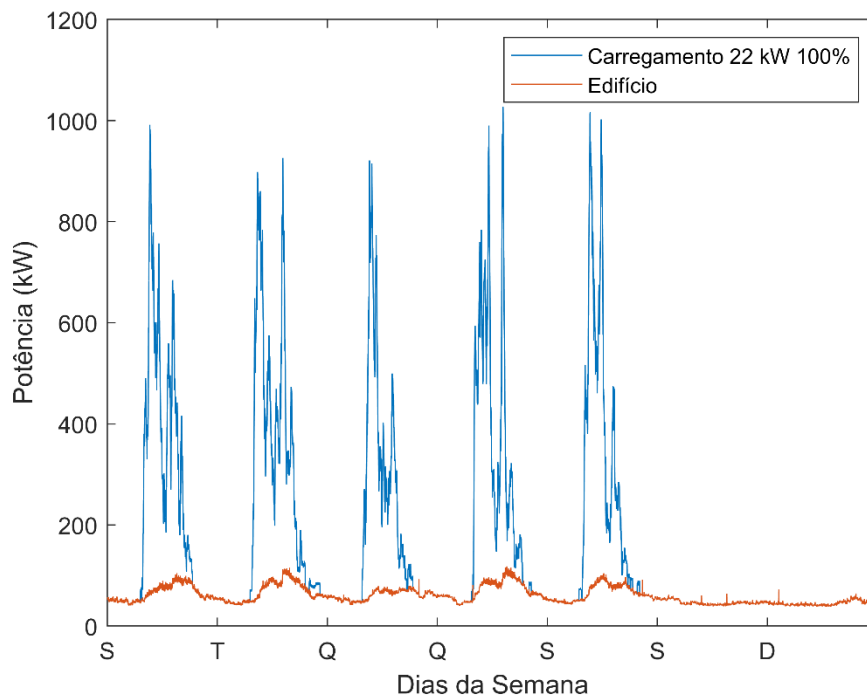


Fig. 4.8 – Diagrama de carga do edifício e do carregamento dos EVs com uma potência de carregamento de 22 kW quando todos os veículos são elétricos.

### 4.3 Gestão de Carregamentos

Quando a metodologia de avaliação de impactos é aplicada aos resultados das metodologias de gestão, os resultados mostram grande melhoria. Como é possível observar na Fig. 4.9, a potência de pico é reduzida em aproximadamente 40% quando são as estratégias de gestão de carregamentos são aplicadas. A figura também demonstra que a gestão múltipla pode não produzir melhores resultados. Atendendo que esta gestão baseia-se num algoritmo genético o aumento do universo de procura gera um aumento da probabilidade de existência de mínimos locais o que perturba a otimização.

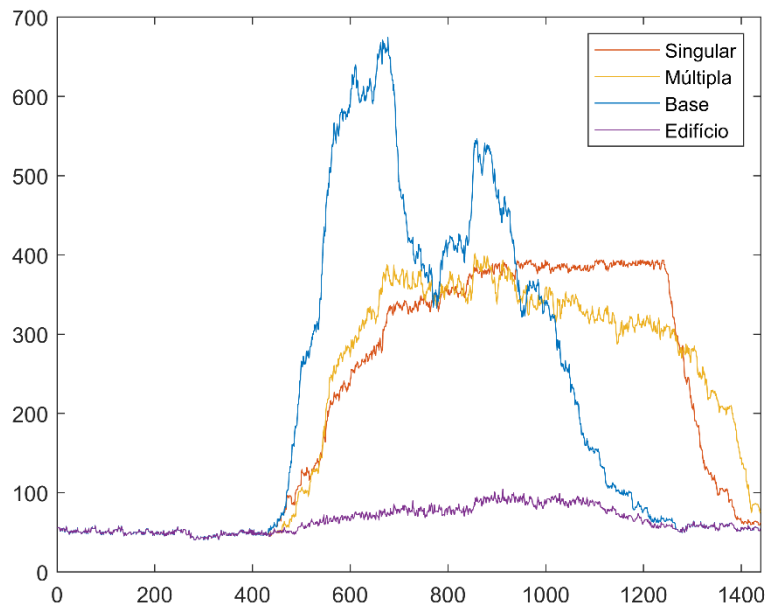


Fig. 4.9 – Comparação entre os diagramas de carga sem gestão e com gestão singular e múltipla com 7,4 kW de potência de carregamento e 8 horas de estadia.

Com base nos resultados é possível afirmar que os algoritmos de gestão possuem uma performance bastante semelhante, especialmente em cenários com baixa penetração de EVs ou potências de carregamento baixas. Apesar da performance ser semelhante no tocante a tempo de processamento a estratégia singular é claramente superior. Em alguns casos a estratégia de gestão múltipla demora até 93 segundos para gerar o perfil de carregamento dos veículos. Este tempo de processamento pode ser um fator determinante na sua implementação a nível real. Por outro lado a estratégia singular é capaz de gerar uma solução em menos de um segundo. Isto é evidenciado pela Fig. 4.10 onde é possível comparar as durações de cada simulação. Nesta imagem cada ponto das curvas a azul representa o tempo de processamento de uma simulação com gestão de carregamento singular. As curvas a vermelho representam as simulações com gestão de carregamento múltipla. Cada simulação é caracterizada por uma percentagem de penetração, uma duração de estadia e uma potência de carregamento. O aumento no tempo de

processamento deve-se ao maior espaço de pesquisa da gestão múltipla. Como o número de veículos disponíveis no parque não influencia a gestão singular o seu tempo de processamento não apresenta variações tão elevadas. Por outro lado, no caso da gestão múltipla com cada entrada de um EV o número de combinações de horários de carregamento aumenta exponencialmente. Assim apesar de a gestão múltipla produzir melhores resultados que a singular, a sua melhoria não é grande o suficiente para compensar o aumento no tempo de processamento. Por estes motivos nas comparações seguintes apenas será considerada a gestão singular.

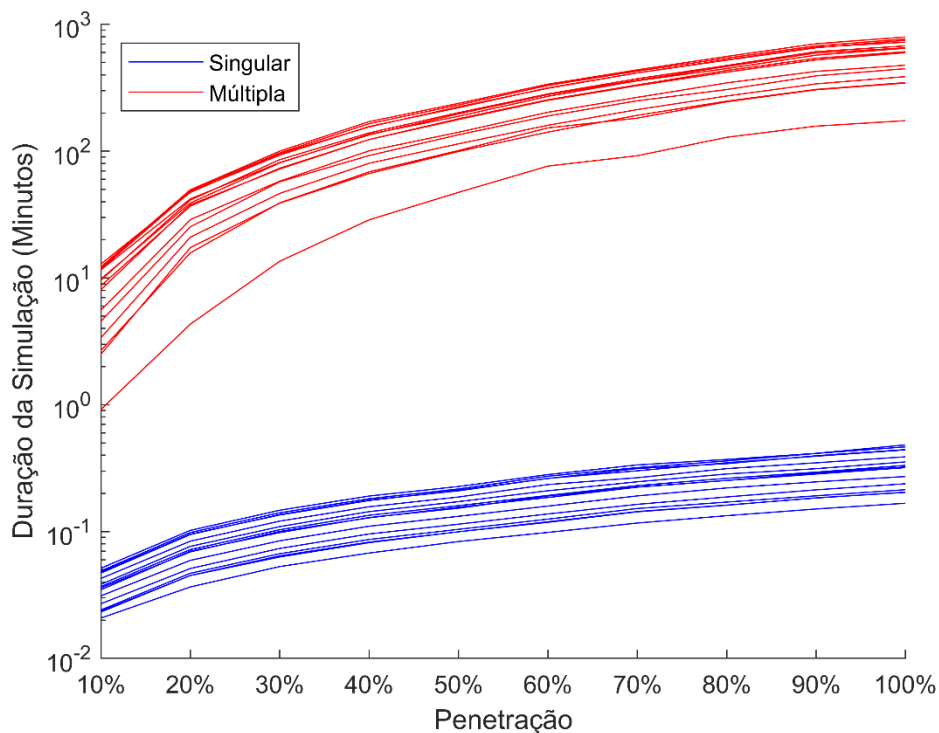


Fig. 4.10 – Comparação das durações das simulações entre a estratégia singular e a múltipla.

Com gestão de carregamento é claramente visível na Fig. 4.11 que há uma redução significativa da potência de pico quando há gestão de carregamento. Apesar de o consumo total permanecer o mesmo o problema dos elevados picos de potência é mitigado pela gestão. Anteriormente um aumento no número de EVs produzia um aumento significativo da potência de pico. Por exemplo, com uma potência de carregamento de 22 kW um aumento de 20% para 30% na penetração de EVs significava aumentar a potência de pico de 366,61 kW para 439,19 kW. No caso do carregamento coordenado com estadia de 12 horas este aumento no número de EVs traduz-se em aumentar o valor de pico de 140,21 kW para 171,74 kW. É possível verificar que mesmo os cenários com maiores potências de carregamento têm valores de pico muito próximos aos com potências mais baixas. Por exemplo, antes da gestão o cenário com 100% de penetração com 3,7kW tem um pico de 621,69 kW e com 22 kW tem um pico de 1027,30 kW.

Com gestão de carregamento estes valores são reduzidos para 366,75 kW e 324,23 kW, respectivamente. É possível verificar que potências de carregamento maiores possuem valores de pico menores quando há gestão do carregamento. Isto deve-se à redução da duração do carregamento com o aumento da potência o que faz com que existam menos veículos a carregar em simultâneo. Se forem aplicadas as mesmas tarifas a estes resultados o custo da potência contratada para 20% e 100% de penetração com 3,7 kW passa a 7,85 € e 18,63€ por dia. Isto representa uma redução de 30% e 40%, respectivamente. As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam os custos por dia com potência contratada para cenários com e sem gestão de carregamento para vários cenários. Estes resultados mostram que a gestão singular apresenta melhores resultados com o aumento da penetração e da potência de carregamento. Atualmente existe uma tendência para o aumento das compras de EVs, este aumento gera uma necessidade de postos de carregamento. Graças aos avanços tecnológicos o carregamento a elevadas potências estará cada vez mais disponível. Como a estratégia de gestão singular apresenta melhores resultados com potências de carregamento mais elevadas esta pode ser uma solução simples para a redução dos custos e mitigação dos impactos. A principal vantagem é que a gestão singular do carregamento de EVs não apresenta uma complexidade temporal de processamento elevada e produz resultados satisfatórios face ao carregamento descoordenado.

*Tabela 4 - Custo por dia da potência contratada para cenários base e com gestão singular de carregamentos, considerando 4 horas de estadia (valores em €).*

|                     |      | Cenário     |              |             |             |            |             |            |             |
|---------------------|------|-------------|--------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
|                     |      | 3,7 kW Base | 3,7 kW Gest. | 7,4 kW Base | 7,4kW Gest. | 10 kW Base | 10 kW Gest. | 22 kW Base | 22 kW Gest. |
| Penetração Elétrica | 10%  | 8,73        | 8,42         | 8,99        | 8,66        | 9,77       | 8,62        | 12,30      | 8,50        |
|                     | 20%  | 10,77       | 10,32        | 13,26       | 10,68       | 14,78      | 10,55       | 18,66      | 10,25       |
|                     | 30%  | 13,81       | 13,24        | 17,55       | 15,42       | 18,48      | 14,70       | 22,35      | 13,60       |
|                     | 40%  | 14,92       | 14,76        | 20,44       | 16,58       | 22,36      | 16,85       | 26,32      | 16,88       |
|                     | 50%  | 17,55       | 16,46        | 22,36       | 18,34       | 23,05      | 18,42       | 29,93      | 18,07       |
|                     | 60%  | 20,56       | 19,48        | 26,46       | 20,64       | 27,26      | 21,39       | 37,21      | 20,26       |
|                     | 70%  | 22,61       | 21,11        | 28,01       | 24,59       | 32,77      | 23,55       | 39,09      | 21,67       |
|                     | 80%  | 25,11       | 24,17        | 32,09       | 26,31       | 36,04      | 24,78       | 45,02      | 23,67       |
|                     | 90%  | 28,29       | 26,53        | 35,86       | 29,12       | 37,74      | 29,81       | 48,41      | 25,61       |
|                     | 100% | 31,64       | 30,64        | 37,46       | 32,37       | 40,01      | 32,75       | 52,29      | 28,59       |

Tabela 5 - Custo por dia da potência contratada para cenários base e com gestão singular de carregamentos, considerando 8 horas de estadia (valores em €).

|                     |      | Cenário     |              |             |             |            |             |            |             |
|---------------------|------|-------------|--------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
|                     |      | 3,7 kW Base | 3,7 kW Gest. | 7,4 kW Base | 7,4kW Gest. | 10 kW Base | 10 kW Gest. | 22 kW Base | 22 kW Gest. |
| Penetração Elétrica | 10%  | 8,73        | 7,57         | 8,99        | 7,29        | 9,77       | 7,20        | 12,30      | 7,58        |
|                     | 20%  | 10,77       | 9,36         | 13,26       | 8,77        | 14,78      | 8,85        | 18,66      | 8,30        |
|                     | 30%  | 13,81       | 11,90        | 17,55       | 11,71       | 18,48      | 10,87       | 22,35      | 10,63       |
|                     | 40%  | 14,92       | 12,27        | 20,44       | 11,81       | 22,36      | 11,45       | 26,32      | 12,07       |
|                     | 50%  | 17,55       | 15,32        | 22,36       | 14,01       | 23,05      | 13,55       | 29,93      | 13,56       |
|                     | 60%  | 20,56       | 15,60        | 26,46       | 15,59       | 27,26      | 15,37       | 37,21      | 14,42       |
|                     | 70%  | 22,61       | 18,20        | 28,01       | 17,39       | 32,77      | 17,13       | 39,09      | 16,94       |
|                     | 80%  | 25,11       | 20,13        | 32,09       | 18,14       | 36,04      | 17,72       | 45,02      | 17,26       |
|                     | 90%  | 28,29       | 20,94        | 35,86       | 19,77       | 37,74      | 19,03       | 48,41      | 18,18       |
|                     | 100% | 31,64       | 23,37        | 37,46       | 22,48       | 40,01      | 21,70       | 52,29      | 19,79       |

Tabela 6 - Custo por dia da potência contratada para cenários base e com gestão singular de carregamentos, considerando 12 horas de estadia (valores em €).

|               |      | Cenário     |              |             |             |            |             |            |             |
|---------------|------|-------------|--------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
|               |      | 3,7 kW Base | 3,7 kW Gest. | 7,4 kW Base | 7,4kW Gest. | 10 kW Base | 10 kW Gest. | 22 kW Base | 22 kW Gest. |
| Penetração EV | 10%  | 8,73        | 6,62         | 8,99        | 6,25        | 9,77       | 6,35        | 12,30      | 6,43        |
|               | 20%  | 10,77       | 7,87         | 13,26       | 7,36        | 14,78      | 7,34        | 18,66      | 7,14        |
|               | 30%  | 13,81       | 9,65         | 17,55       | 9,38        | 18,48      | 8,98        | 22,35      | 8,74        |
|               | 40%  | 14,92       | 9,88         | 20,44       | 9,64        | 22,36      | 9,46        | 26,32      | 9,09        |
|               | 50%  | 17,55       | 11,63        | 22,36       | 11,01       | 23,05      | 11,24       | 29,93      | 10,77       |
|               | 60%  | 20,56       | 12,90        | 26,46       | 12,31       | 27,26      | 12,03       | 37,21      | 11,50       |
|               | 70%  | 22,61       | 14,36        | 28,01       | 13,26       | 32,77      | 13,28       | 39,09      | 13,09       |
|               | 80%  | 25,11       | 15,11        | 32,09       | 14,26       | 36,04      | 13,70       | 45,02      | 13,76       |
|               | 90%  | 28,29       | 16,07        | 35,86       | 14,96       | 37,74      | 14,72       | 48,41      | 14,62       |
|               | 100% | 31,64       | 18,67        | 37,46       | 17,07       | 40,01      | 17,07       | 52,29      | 16,50       |

Um fator importante também a ter em consideração é a duração da estadia. Quanto maior a estadia considerada melhores são os resultados. Este resultado é evidenciado pelas figuras Fig. 4.11, Fig. 4.12 e Fig. 4.13. O cenário com 12 horas de estadia apresenta a maior melhoria na redução da potência de pico. Isto deve-se há existência de um intervalo maior de valores possíveis para o início do carregamento. Este efeito é mais evidente em valores de potência de carregamento maiores onde a duração do carregamento é menor. Em valores de potência menores a duração do carregamento pode ser elevada, fazendo com que os carregamentos continuem a ser simultâneos. Por vezes a duração do carregamento é maior que a estadia do veículo e o perfil de carregamento modificado é igual ao original. Este fenómeno verifica-se

sobretudo nos cenários com potência de carregamento de 3.7 kW e estadia de 4 horas como é demonstrado na Fig. 4.13.

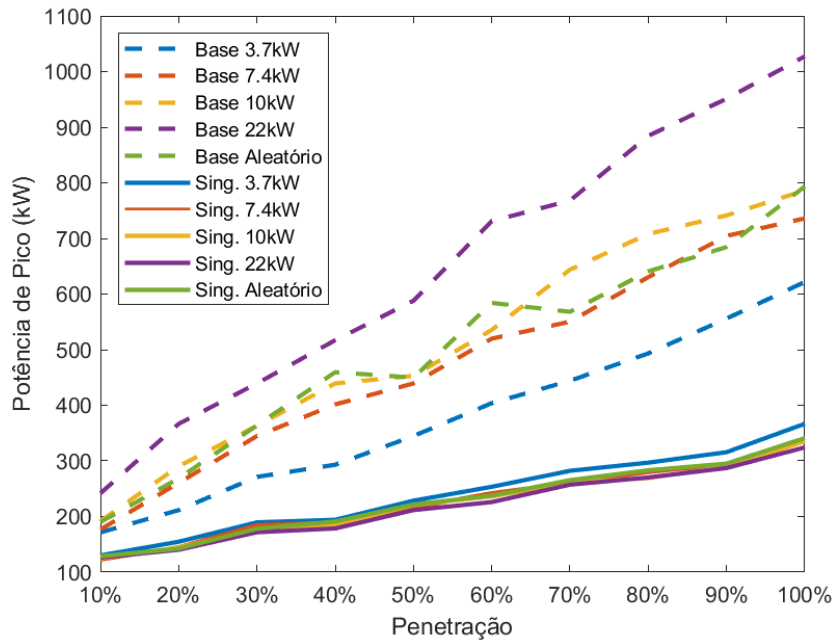


Fig. 4.11 – Comparação da potência de pico entre cenários com e sem gestão com estadia de 12 horas.

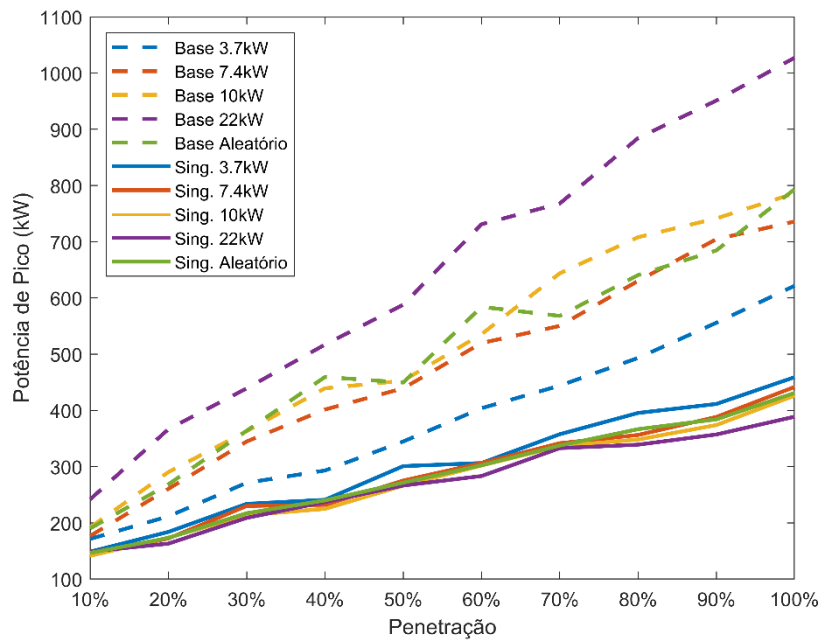


Fig. 4.12 – Comparação da potência de pico entre cenários com e sem gestão com estadia de 8 horas.

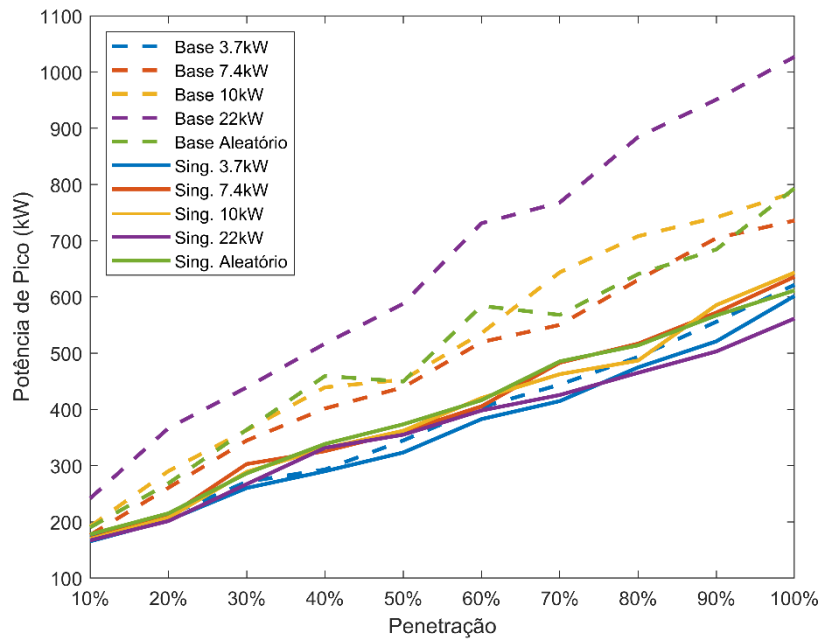


Fig. 4.13 – Comparação da potência de pico entre cenários com e sem gestão com estadia de 4 horas.

Como referido nas secções anteriores esta gestão só é possível devido à existência de flexibilidade energética no carregamento dos veículos elétricos. Como também já foi mencionado para obter o perfil da flexibilidade utilizada após a gestão é necessário calcular a diferença entre o perfil modificado e o perfil base. Isto pode ser aplicado a um veículo como é o exemplo da Fig. 4.14. No entanto se este método for aplicado ao conjunto dos EVs é possível obter o perfil da flexibilidade obtida através da agregação dos veículos. Um exemplo de perfis de flexibilidade agregada é apresentado na Fig. 4.15. É possível verificar que ao reduzir o pico nas horas de maior consumo é necessário compensar mais tarde já que o sistema é isolado e o consumo total não se altera. Quanto maior a estadia maior é o espaço de tempo em que os veículos podem ser distribuídos. Assim, com estadias baixas tem-se um perfil com mínimos muito acentuados e um maior *rebound*. Por outro lado com estadias maiores o valor mínimo é mais acentuado enquanto que a porção positiva da flexibilidade não apresenta valores máximos tão elevados.

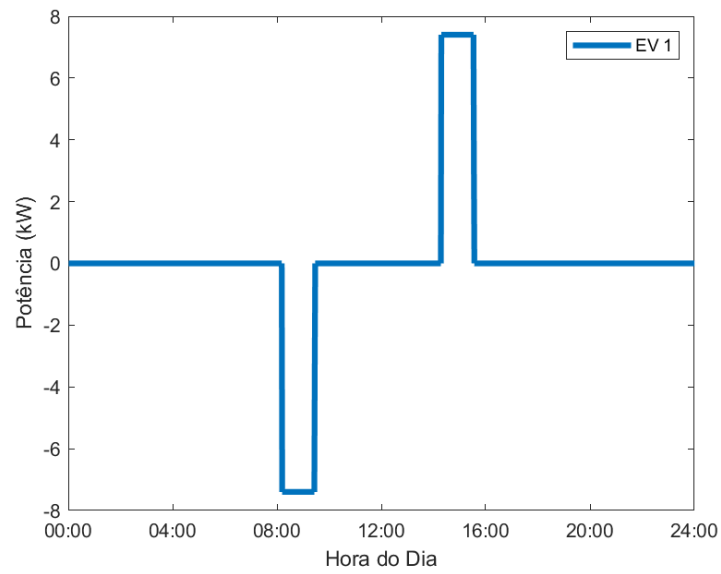


Fig. 4.14 – Perfil da flexibilidade energética utilizada de um veículo.

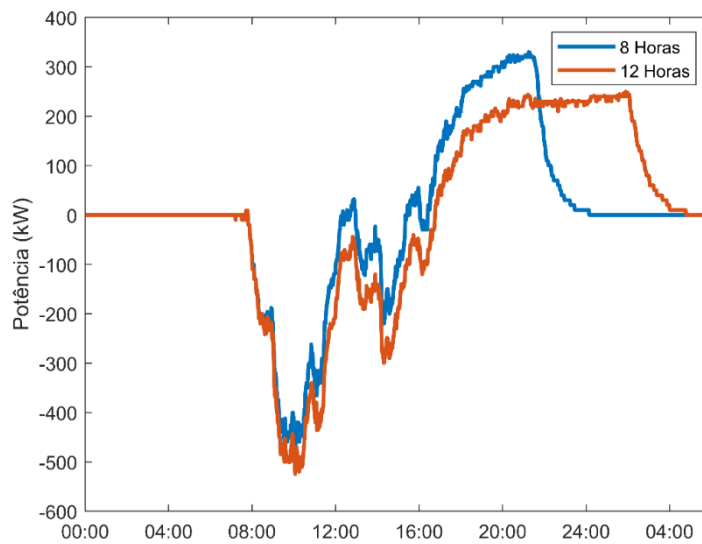


Fig. 4.15 – Perfis da flexibilidade energética agregada utilizada com 8 e 12 horas de estadia.



## 5. Considerações Finais

Este último capítulo conclui a dissertação. As secções 5.1 e 5.2 fornecem uma revisão do trabalho realizado e uma descrição das principais contribuições, respectivamente. A secção 5.3 conclui o capítulo com uma lista de oportunidades de pesquisa futura abertas por este trabalho.

### 5.1 Revisão Geral

Motivadas sobretudo pelas suas vantagens ambientais e incentivos económicos, as aquisições de veículos elétricos são cada vez mais comuns. O número de veículos elétricos tem vindo a crescer e a tendência é este crescimento manter-se. No entanto estes veículos apresentam novos desafios e oportunidades aquando da sua integração com os sistemas de distribuição de energia elétrica existentes. Um dos principais desafios é o carregamento descoordenado dos veículos.

De modo a colaborar com a comunidade científica na resolução deste desafio neste trabalho foram desenvolvidas duas metodologias. A primeira diz respeito ao estudo dos impactos do carregamento descoordenado dos veículos elétricos e a segunda propõe uma solução para a gestão dos carregamentos dos veículos elétricos. A segunda metodologia compreende duas estratégias. A primeira considera a gestão singular dos carregamentos, enquanto que a segunda a gestão múltipla dos mesmos.

A ambas as metodologias foram aplicadas a um caso de estudo centrado na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Neste caso de estudo foram considerados dados reais para todas as entradas necessárias. Os resultados mostram que um dos principais impactos da integração de veículos elétricos nos sistemas de distribuição de energia elétrica, é o aumento da repentina da potência consumida edifício. Este aumento repentino leva a aumentos da potência de pico em até 8,5 vezes quando comparado com cenários sem carregamento. Os resultados das metodologias de gestão mostram reduções da potência de pico em até 70% sem alteração no consumo total de energia dos carregamentos. A aplicação destas metodologias em cenários reais é uma possibilidade, especialmente se for considerada a gestão singular, sendo que esta estratégia de gestão possui performances comparáveis com as da gestão múltipla e no entanto possui tempos de processamento muito menores.

### 5.2 Contribuições Originais

Os resultados obtidos demonstram que os principais impactos do aumento de penetração de EVs numa frota de veículos são o aumento da potência de pico e do consumo total. O aumento da potência de pico é amplificado com o aumento da potência de carregamento considerada. Isto mostra que a integração de carregadores de elevada potência na rede elétrica de um edifício não é viável mesmo em cenários de baixa penetração de veículos. O carregamento

descoordenado a uma potência de 22 kW com 10% e 20% apresentam um aumento de 41 % e 73 % respectivamente face ao carregamento descoordenado a 3,7 kW.

Assim o constante aumento na adoção de veículos elétricos não pode ser apenas acompanhado com a instalação de carregadores nos edifícios, sendo também necessária a gestão dos carregamentos. A gestão dos carregamentos pode ser efetuada em cada veículo separadamente ou considerando múltiplos veículos. Os resultados mostram que a estratégia de gestão múltipla considerada tem uma performance melhor em cenários onde o universo de procura da solução é menor. O universo de procura aumenta com o aumento da estadia do utilizador e da potência de carregamento. Assim apesar de o aumento da estadia possibilitar uma dispersão maior dos carregamentos ao longo do tempo o maior universo de soluções faz com que exista uma maior probabilidade de existência de mínimos locais o que pode dificultar a otimização dos carregamentos. Além disso com o aumento da estadia o tempo de processamento da estratégia de gestão múltipla aumenta significativamente. A estratégia de gestão singular não é tão afetada pelo aumento da estadia já que o aumento do universo de soluções com o aumento da estadia é linear enquanto que no caso da gestão múltipla é exponencial.

À parte dos resultados acima comentados este trabalho também contribui para comunidade científica com:

- Uma metodologia que permite avaliar os impactos causados pelo carregamento tanto descoordenado como coordenado de EVs.
- Uma metodologia que possibilita a gestão do carregamento de EVs de forma individual ou com múltiplos veículos considerando as preferências do utilizador.
- Um caso de estudo assente em dados reais que permite avaliar os impactos introduzidos pelo carregamento de veículos elétricos num edifício e estudar os benefícios resultantes da exploração da flexibilidade energética existente.

### 5.3 Trabalhos Futuros

O trabalho apresentado nesta dissertação pode ser aprofundado através de mais pesquisas nesta área. Estas pesquisas podem seguir quatro principais direções. A primeira diz respeito à melhoria das atuais metodologias. Esta melhoria pode ser alcançada através do estudo de diferentes ferramentas para gestão múltipla de carregamentos. Esta gestão consegue utilizar ao máximo a flexibilidade oferecida pelos veículos, no entanto o elevado tempo de processamento impede a sua implementação num cenário real. Outra direção seria a utilização de funções multiobjectivo para obter os custos do cenário modificado considerando as condições de operação da rede. A utilização de funções multiobjectivo permite gerir o carregamento de modo a produzir benefícios tanto para a operação da rede como para o consumidor. Uma vez que o custo para o utilizador do EV não foi considerado, a utilização das metodologias para

implementar um agregador de EVs também é uma opção. Este agregador poderia fornecer serviços considerando a disponibilidade dos veículos para a gestão do consumo de energia. A última direção refere-se ao desenvolvimento de um protótipo e a implementação do mesmo num parque de carregadores de veículos elétricos associado a um edifício. Esta implementação é importante para testar a viabilidade da gestão de carregamento em cenários reais.



## Bibliografia

- [1] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2016*. 2016 DOI: 10.1787/weo-2016-en.
- [2] European Commission, “A Clean Planet for all. A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy - Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European and Social Committee and the Committee,” p. 25, 2018.
- [3] EU Commission, “Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council setting emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles as part of the Union’s integrated approach to reduce CO2 emissions from light-duty,” vol. 1, no. 1, pp. 71–83, 2017 DOI: 10.1002/ejoc.201200111.
- [4] A. L. Pereira, J. F. Fardin, and L. F. Encarnacao, “Electric vehicles as motivators for smart grids,” *SBSE 2018 - 7th Brazilian Electr. Syst. Symp.*, pp. 1–6, 2018 DOI: 10.1109/SBSE.2018.8395791.
- [5] “EV-Volumes - The Electric Vehicle World Sales Database.” [Online]. Available: <http://www.ev-volumes.com/news/global-ev-sales-for-2018/>. [Accessed: 16-Sep-2019].
- [6] EEA, *Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives*, no. 13. 2018 DOI: 10.2800/77428.
- [7] EU Commission, “Comission Staff Working Document Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy,” 2018.
- [8] D. Hall and N. Lutsey, “ICCT : Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions,” 2018 DOI: 10.1088/1748-9326/11/5/054010.
- [9] “Task 31, Fuels and Energy Carriers for Transport - Ongoing Tasks | IA-HEV.” [Online]. Available: <http://www.ieahev.org/tasks/task-31-fuels-and-energy-carriers-for-transport/>. [Accessed: 05-Dec-2018].
- [10] H. Campello-Vicente, R. Peral-Orts, N. Campillo-Davo, and E. Velasco-Sanchez, “The effect of electric vehicles on urban noise maps,” *Appl. Acoust.*, vol. 116, pp. 59–64, 2017 DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.09.018.
- [11] A. Soret, M. Guevara, and J. M. Baldasano, “The potential impacts of electric vehicles on air quality in the urban areas of Barcelona and Madrid (Spain),” *Atmospheric Environment*, vol. 99, no. 2, Elsevier Ltd, pp. 51–63, 2014 DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.09.048.
- [12] Y. Zhou, M. Wang, H. Hao, L. Johnson, H. Wang, and H. Hao, “Plug-in electric vehicle market penetration and incentives: a global review,” *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, vol. 20, no. 5, pp. 777–795, 2015 DOI: 10.1007/s11027-014-9611-2.
- [13] J. J. . Saldanha, “Gerenciamento Inteligente da Recarga de Veículos Elétricos Otimizando a Operação do Sistema Elétrico de Potência.” Universidade Federal do Pampa - Alegrete - RS, 2017.
- [14] S. Zhang, R. Xiong, and F. Sun, “Model predictive control for power management in a plug-in hybrid electric vehicle with a hybrid energy storage system,” *Appl. Energy*, vol. 185, pp. 1654–1662, 2017 DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.12.035.
- [15] R. A. Lopes, A. Chambel, J. Neves, D. Aelenei, and J. Martins, “A Literature Review of Methodologies Used to Assess the Energy Flexibility of Buildings,” *Energy Procedia*, vol. 91, pp. 1053–1058, 2016 DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.274.
- [16] R. G. Junker *et al.*, “Characterizing the energy flexibility of buildings and districts,” *Appl. Energy*, vol. 225, no. February, pp. 175–182, 2018 DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.05.037.
- [17] R. D’hulst, W. Labeeuw, B. Beusen, S. Claessens, G. Deconinck, and K. Vanthournout, “Demand response flexibility and flexibility potential of residential smart appliances:

- Experiences from large pilot test in Belgium,” *Appl. Energy*, vol. 155, pp. 79–90, 2015 DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.05.101.
- [18] G. Reynders, R. Amaral Lopes, A. Marszal-Pomianowska, D. Aelenei, J. Martins, and D. Saelens, “Energy flexible buildings: An evaluation of definitions and quantification methodologies applied to thermal storage,” *Energy Build.*, vol. 166, pp. 372–390, 2018 DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.02.040.
- [19] F. Oldewurtel, D. Sturzenegger, G. Andersson, M. Morari, and R. S. Smith, “Towards a standardized building assessment for demand response,” *Proc. IEEE Conf. Decis. Control*, pp. 7083–7088, 2013 DOI: 10.1109/CDC.2013.6761012.
- [20] T. Nuytten, B. Claessens, K. Paredis, J. Van Bael, and D. Six, “Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating,” *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 583–591, 2013 DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.11.029.
- [21] D. Six, J. Desmedt, D. Vanhoudt, and J. Van Bael, “Exploring the flexibility potential of residential heat pumps combined with thermal energy storage for smart grids,” *21st Int. Conf. Electr. Distrib.*, vol. 21, no. 0442, pp. 0442–0442, 2011.
- [22] R. De Coninck, “Grey-Box Based Optimal Control for Thermal Systems in Buildings Unlocking Energy Efficiency and Flexibility,” June, 2015 DOI: 10.13140/RG.2.1.4761.6166.
- [23] R. De Coninck and L. Helsen, “Bottom-up quantification of the flexibility potential of buildings,” *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 2013.
- [24] S. Rajakaruna, F. Shahnia, and A. Ghosh, “*Plug In Electric Vehicles in Smart Grids Charging Strategies*”. Springer, 2015 DOI: 10.1007/978-981-287-317-0.
- [25] I. Lampropoulos, W. L. Kling, P. F. Ribeiro, and J. Van Den Berg, “History of demand side management and classification of demand response control schemes,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 31–35, 2013 DOI: 10.1109/PESMG.2013.6672715.
- [26] C. W. Gellings, “The Concept of Demand-Side Management for Electric Utilities,” *Proc. IEEE*, vol. 73, no. 10, pp. 1468–1470, 1985 DOI: 10.1109/PROC.1985.13318.
- [27] CIGRE Working Group C6.09, *Demand Side Integration*, no. August. 2011.
- [28] A. S. Chuang and C. W. Gellings, “Demand-side Integration in a Restructured Electric Power Industry.”
- [29] E. Guelpa *et al.*, “Demand side management in district heating networks: a real application,” *Energy*, vol. 182, pp. 433–442, 2019 DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.131.
- [30] H. Cai, C. Ziras, S. You, R. Li, K. Honoré, and H. W. Bindner, “Demand side management in urban district heating networks,” *Appl. Energy*, vol. 230, no. July, pp. 506–518, 2018 DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.08.105.
- [31] Smart Energy Demand Coalition, “Explicit Demand Response in Europe Mapping the Markets 2017 Smart Energy Demand Coalition,” 2017.
- [32] “Solar Impulse Clean Technologies to Fly Around the World.” [Online]. Available: <https://aroundtheworld.solarimpulse.com/>. [Accessed: 11-Jul-2019].
- [33] EEA, *Electric Vehicles in Europe. European Environmental Agency Report No 20/2016*, no. 20. 2016 DOI: 10.2800/100230.
- [34] M. K. Yoong *et al.*, “Studies of regenerative braking in electric vehicle,” *IEEE Conf. Sustain. Util. Dev. Eng. Technol. 2010, STUDENT 2010 - Conf. Bookl.*, no. November, pp. 40–45, 2010 DOI: 10.1109/STUDENT.2010.5686984.
- [35] D. Sandeep, *Electric Vehicle Battery Systems*. Newness 2016 DOI: 10.1016/b978-0-7506-9916-7.x5000-6.
- [36] M. A. Delucchi and T. E. Lipman, “An analysis of the retail and lifecycle cost of battery-powered electric vehicles,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 6, no. 6, pp. 371–

- 404, 2001 DOI: 10.1016/S1361-9209(00)00031-6.
- [37] S. Kara, W. Li, and N. Sadjiva, "Life Cycle Cost Analysis of Electrical Vehicles in Australia," *Procedia CIRP*, vol. 61, pp. 767–772, 2017 DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.179.
- [38] M. Mruzek, I. Gajdáč, L. Kučera, and T. Gajdošík, "The Possibilities of Increasing the Electric Vehicle Range," *Procedia Eng.*, vol. 192, pp. 621–625, 2017 DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.107.
- [39] L. Zhang and X. Cai, "Control strategy of regenerative braking system in electric vehicles," *Energy Procedia*, vol. 152, pp. 496–501, 2018 DOI: 10.1016/j.egypro.2018.09.200.
- [40] A. K. Madhusudhanan, "A method to improve an electric vehicle's range: Efficient Cruise Control," *Eur. J. Control*, 2018 DOI: 10.1016/j.ejcon.2018.12.006.
- [41] M. Kezunovic, S. Meliopoulos, V. Venkatasubramanian, and V. Vittal, *Power Electronics and Power Systems*. 2014 DOI: 10.1007/978-1-4614-0134-6.
- [42] F. Marra *et al.*, "Implementation of an Electric Vehicle Test Bed Controlled by a Virtual Power Plant for Contributing to Regulating Power Reserves," pp. 1–7, 2012.
- [43] W. A. Faucett, "Electric vehicle conductive charging system – Part 1: General requirements," *Genet. Test. Mol. Biomarkers*, vol. 14, no. 5, p. 585, 2010 DOI: 10.1089/gtmb.2010.1513.
- [44] J. Martínez-Lao, F. G. Montoya, M. G. Montoya, and F. Manzano-Agugliaro, "Electric vehicles in Spain: An overview of charging systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. June, pp. 970–983, 2017 DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.239.
- [45] N. Chowdhury, B. Price, A. Smith, G. Kortuem, J. van der Linden, and J. Moore, "EV charging," 2016 DOI: 10.1145/2968219.2968346.
- [46] P. Machura and Q. Li, "A critical review on wireless charging for electric vehicles," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 104, no. December 2018, pp. 209–234, 2019 DOI: 10.1016/j.rser.2019.01.027.
- [47] R. J. Bessa, M. A. Matos, F. J. Soares, and J. A. P. Lopes, "Optimized bidding of a EV aggregation agent in the electricity market," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 443–452, 2012 DOI: 10.1109/TSG.2011.2159632.
- [48] J. A. P. Lopes, F. J. Soares, and P. M. R. Almeida, "Integration of electric vehicles in the electric power system," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 168–183, 2011 DOI: 10.1109/JPROC.2010.2066250.
- [49] S. I. Vagropoulos and A. G. Bakirtzis, "Optimal bidding strategy for electric vehicle aggregators in electricity markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 4031–4041, 2013 DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2274673.
- [50] S. Faddel, A. T. Al-Awami, and M. A. Abido, "Fuzzy Optimization for the Operation of Electric Vehicle Parking Lots," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 145, pp. 166–174, 2017 DOI: 10.1016/j.epsr.2017.01.008.
- [51] O. Erdinc, N. G. Paterakis, T. D. P. Mendes, A. G. Bakirtzis, and J. P. S. Catalão, "Smart Household Operation Considering Bi-Directional EV and ESS Utilization by Real-Time Pricing-Based DR," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1281–1291, 2015 DOI: 10.1109/TSG.2014.2352650.
- [52] I. Grau Unda, P. Papadopoulos, S. Skarvelis-Kazakos, L. M. Cipcigan, N. Jenkins, and E. Zabala, "Management of electric vehicle battery charging in distribution networks with multi-agent systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 110, pp. 172–179, 2014 DOI: 10.1016/j.epsr.2014.01.014.
- [53] K. Ramakrishna Reddy and S. Meikandasivam, "Optimal distribution of Plug-In-Electric Vehicle's storage capacity using Water Filling Algorithm for load flattening and vehicle prioritization using ANFIS," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 165, no. April, pp. 120–133, 2018 DOI: 10.1016/j.epsr.2018.09.012.

- [54] E. Karfopoulos and N. Hatziaargyriou, “Distributed coordination of electric vehicles for conforming to an energy schedule,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 151, pp. 86–95, 2017 DOI: 10.1016/j.epsr.2017.05.018.
- [55] L. Gan, U. Topcu, and S. H. Low, “Optimal Decentralized Protocol for Electric Vehicle Charging,” pp. 1–12, 2012.
- [56] L. Wang and B. Chen, “Dual-level consensus-based frequency regulation using vehicle-to-grid service,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 167, pp. 261–276, Feb. 2019 DOI: 10.1016/j.epsr.2018.10.022.
- [57] Y. Wang, T. John, and B. Xiong, “A two-level coordinated voltage control scheme of electric vehicle chargers in low-voltage distribution networks,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 168, no. November 2018, pp. 218–227, 2019 DOI: 10.1016/j.epsr.2018.12.005.
- [58] R. M. A. Lopes, “Extending nearly Zero-Energy Buildings Load Matching Improvement to Community-Level,” 2017.
- [59] J. H. Holland, C. Langton, and S. W. Wilson, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. 1992.
- [60] J. R. Koza, “CiteSeerX — Genetic Programming,” 1997.
- [61] D. Wang, J. Coignard, T. Zeng, C. Zhang, and S. Saxena, “Quantifying electric vehicle battery degradation from driving vs. vehicle-to-grid services,” *J. Power Sources*, vol. 332, pp. 193–203, Nov. 2016 DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.09.116.
- [62] “Instalações | Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.” [Online]. Available: <https://www.dee.fct.unl.pt/instalacoes>. [Accessed: 22-Jul-2019].
- [63] N. B. R. de C. Pereira, “Eficiência Energética No Sector Dos Transportes Rodoviários: Metodologia Para Quantificação Do Excesso De Energia Consumida Devido Ao Factor Comportamental Na Condução De Veículos Automóveis Ligeiros,” *Fac. Ciências e Tecnologia, FCT-NOVA.*, p. 14, 2011.
- [64] “Caparica, Setúbal - Google Maps.” [Online]. Available: <https://www.google.pt/maps/@38.660147,-9.2032327,3a,75y,318h,80.32t/data=!3m6!1e1!3m4!1sj-NgzQfde0jDM1CgutR0qg!2e0!7i13312!8i6656>. [Accessed: 29-Jul-2019].
- [65] “FCT - Google Maps.” [Online]. Available: <https://www.google.pt/maps/place/FCT/@38.6596662,-9.2039832,268m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0xd1ecada48566bb1:0x55cb23cb663b5d97!8m2!3d38.6600924!4d-9.2032053>. [Accessed: 29-Jul-2019].
- [66] L. A. Ellingsen, B. Singh, I. E. Programme, and A. H. Strømman, “Supplementary data for The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles,” *Environ. Res. Lett.*, vol. 11, no. 5, p. 054010, 2016 DOI: 10.1088/1748-9326/11/5/054010.
- [67] European Environment Agency, *Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives TERM 2018: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report EEA Report No 13/2018*, no. 13. 2018.
- [68] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), “Tarifas transitórias de venda a clientes finais em Portugal continental,” 2019.