

# **Optimização do processo de carregamento de veículos eléctricos**

Joana dos Santos Martinho Rebelo





# Optimização do processo de carregamento de veículos eléctricos

Joana dos Santos Martinho Rebelo

Dissertação para a obtenção do Grau de **Mestre em Matemática**  
Área de Especialização em **Estatística, Optimização e Matemática Financeira**

## Júri

**Presidente:** Luís Nunes Vicente  
**Orientador:** João Eduardo da Silveira Gouveia  
**Vogais:** Marta Margarida Braz Pascoal  
Rodrigo Tiago Maia

**Data: Junho de 2013**



# Resumo

Nesta dissertação estudamos o problema de calendarização do carregamento dos veículos eléctricos (VE) numa estação de carregamento. Assumimos que apenas um número limitado de VE podem carregar simultaneamente por instante e que relativamente a cada um deles possuímos a informação da quantidade de energia que necessitam para carregar e o tempo disponível para o fazer. Ao contrário do que se verifica em muitas abordagens aplicadas a este problema, neste trabalho é permitida a possibilidade de interromper o carregamento dos VE .

Neste trabalho descreveremos o problema do planeamento do carregamento dos VE, apresentando a sua formulação matemática segundo duas abordagens, discreta e contínua. Desenvolveremos um novo método baseado numa regra de despacho de modo a abordar o problema de calendarização de forma discreta, designado método da folga. Posteriormente serão consideradas diversas extensões deste método abordando várias vertentes do problema, nomeadamente o caso de não admissibilidade, minimização de interrupções e a implementação de um sistema de reserva. Por último, serão apresentados resultados numéricos para análise dos métodos propostos.

**Palavras Chave:** veículo eléctrico, carregamento, planeamento, folga

# Abstract

In this thesis, we study the problem of scheduling the charging of electric vehicles (EV) at a charging station. We assume only a limited number of EV can charge simultaneously and that for each of them we know the amount of energy needed and the available time to do it. Unlike what occurs in many approaches to this problem, in this work we allow the possibility to interrupt the charging of EV.

In this work we describe the problem of planning the charging of EV, formulating it according to two approaches, discrete and continuous. We will develop a new method based on dispatching rules to solve the scheduling problem in a discrete approach, designated slack method. Extensions of this method will be developed for solving various aspects of this problem, notably the case of non-admissibility, minimizing the interruptions and implementing a reservation system. Finally, numerical results are presented analysing the methods proposed.

**Keywords:** electric vehicle, charging, scheduling , slack



# Agradecimentos

*A realização desta dissertação de mestrado contou com cruciais apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado uma realidade e aos quais estarei eternamente grata.*

*Ao meu orientador Professor João Gouveia, pela sua orientação, total apoio, disponibilidade, pelas opiniões e críticas, total colaboração no solucionar de dúvidas e problemas que foram surgindo ao longo deste trabalho e pelo saber que transmitiu.*

*Aos meus pais e irmão por todo o apoio incondicional, incentivo, paciência e total ajuda na superação dos obstáculos que ao longo deste trabalho foram surgindo.*

*Ao colega Xavier Fernandes pelo trabalho de equipa desenvolvido, pelos conhecimentos transmitidos e pelo apoio na dissertação.*

*A todos os meus amigos e colegas que fizeram parte destes momentos com todo a ajuda, apoio e incentivo.*

*Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito dos trabalhos de uma bolsa de investigação para licenciados financiada pelo Projecto mobiOS – mobility Operating System, QREN, Agência de Inovação.*







# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Problema de planeamento de carregamento</b>	<b>5</b>
2.1	Formulação discreta . . . . .	5
2.2	Método sem interrupções . . . . .	7
2.3	Job Shop Scheduling . . . . .	8
2.4	Método da Folga . . . . .	11
2.4.1	Complexidade . . . . .	15
2.5	Abordagem contínua . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Extensões do Método da Folga</b>	<b>21</b>
3.1	Não admissibilidade . . . . .	21
3.1.1	Folgas negativas . . . . .	21
3.1.2	Alterações ao último veículo . . . . .	23
3.2	Minimização de trocas . . . . .	25
3.3	Sistema de reserva de energia . . . . .	27
3.3.1	Aplicação do Método da Folga . . . . .	28
3.3.2	Reaproveitamento de energia . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Resultados numéricos</b>	<b>37</b>
4.1	Geração de dados . . . . .	37
4.2	Análise comparativa do Método da Folga . . . . .	38
4.3	Extensões . . . . .	41
4.3.1	Minimização de trocas . . . . .	41
4.3.2	Sistema de reserva de energia . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>47</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>49</b>



# Capítulo 1

## Introdução

Nos últimos 150 anos temos vindo a assistir a uma acentuada degradação climática. Com o risco cada vez maior da escassez de recursos e com os custos de vida cada vez mais elevados, a comunidade científica voltou a virar-se para os projectos da utilização de energias renováveis. Em todo o mundo tenta-se cada vez mais aprimorar a utilização de energias renováveis, tais como as energias solar, eólica, geotérmica, hídrica entre outras. Tem-se visto em todas as áreas um uso cada vez mais intensivo destas energias e um investimento cada vez maior. Assim, o veículo eléctrico que já existe à cerca de 100 anos, tem sido visto como uma das medidas para reduzir os gases carbónicos, ou gases de efeito de estufa.

Os veículos eléctricos são exactamente iguais aos outros veículos do ponto de vista mecânico, apenas difere a fonte de energia, sendo este alimentado a electricidade proveniente de uma bateria, que contém energia armazenada sob a forma de um potencial electroquímico.

O veículo eléctrico sofreu a concorrência do motor a combustão desde o início do século XX. Apesar de ter sempre estado, tecnologicamente, bem à frente em termos de eficiência, sofria do problema da autonomia, do tempo de carregamento, do preço e peso das baterias. Era, no entanto, um veículo apreciado, sendo que, já na altura, se criticava a sujidade dos motores a gasolina.

Com o advento das guerras mundiais, foram necessários veículos que tivessem a maior autonomia possível mesmo com prejuízo de qualquer poluição que fizessem ou da manifesta ineficiência na utilização de energia. Esta cadeia de acontecimentos permitiu uma grande redução dos custos dos veículos a combustão, criando uma competição demasiado forte, aliada aos baixos preços do petróleo.

Com a concentração do transporte na utilização de combustíveis fósseis, a tecnologia do veículo eléctrico manteve-se “congelada” durante décadas, sendo no entanto muito utilizada em veículos industriais como, por exemplo, máquinas empilhadoras. Para o final da segunda metade do século XX, com as primeiras crises petrolíferas,

e com o desenvolvimento das baterias, motivado pela crescente utilização de aparelhos telefónicos móveis, o veículo eléctrico começou a ressurgir como uma tecnologia adequada à maioria das utilizações de transporte e como uma excelente solução para os vários problemas criados pela motorização a combustão.

O abastecimento de veículos eléctricos poderá ocorrer em qualquer local com a exigência de acesso à rede eléctrica, contrariamente ao que sucede com os veículos a combustão, em que o abastecimento é feito em bombas de combustíveis.

Dado que o carregamento dos veículos eléctricos é feito através da rede eléctrica surge o interesse em estudar e desenvolver diferentes alternativas para proceder ao carregamento destes veículos. Com o aumento do número de veículos eléctricos em circulação, aumenta também o seu impacto nos sistemas eléctricos. Por este motivo, a investigação sobre o carregamento dos veículos eléctricos iniciou-se com estudos de impacto e análise de cenários, exemplos desses estudos foram realizados por Putrus *et al.* [16], Hadley *et al.* [9], e em particular referente ao território português realizado por Camus *et al.* [4]. Neste contexto o foco é muitas vezes direccionado para os picos de procura de energia ao longo do dia, a alteração desses padrões de procura e as limitações das próprias redes.

Outras perspectivas mais ligadas às questões ambientais, procuram contemplar a inclusão de energias renováveis (nalguns casos energia eólica ou solar como é referido por Masuch *et al.* [12]) aquando da afectação de recursos e definição dos planos de carregamento, tentando assim efectivamente alcançar as vantagens num plano ecológico como mostrado por Zhang *et al.* [21].

Em termos de coordenação e gestão dos carregamentos, as abordagens diferem também nos objectivos tomados em consideração. K.Clement *et al.* [6] procuraram uma solução através de programação estocástica para minimizar as perdas energéticas. Existem outros trabalhos, como é o exemplo do trabalho de Zhang *et al.* [21], em que a chegada dos veículos foi modelada segundo uma cadeia de Markov e cujo objectivo passa por minimizar o tempo de espera na estação de carregamento.

Para a resolução do problema foram tidas em conta, na literatura, algumas abordagens para a resolução do problema do carregamento de veículos eléctricos recorrendo explicitamente a métodos de optimização como o desenvolvido por Leemput *et al.* [11]. Shrestha *et al.* [17] recorreram a ferramentas de Programação Quadrática para minimizar os custos de carregamentos dos veículos eléctricos, isto tendo em conta o preço variável da electricidade. Com uma orientação mais técnica, Sundström

*et al.* [19] incidiram sobre os comportamentos e limitações das baterias. Contudo, e apesar de terem utilizado métodos de optimização (linear e quadrática), as calendarizações são feitas considerando os veículos que chegam ao sistema enquanto frota e não individualmente como será exposto neste trabalho.

Pretendemos determinar um plano de carregamento local que, em cada momento e sem exceder a energia disponível existente na rede eléctrica, indique como distribuir essa mesma energia pelos veículos em carregamento de modo a cumprir os seus prazos e necessidades de carga ou, caso isso não seja possível, encontre o melhor prazo possível que o possibilite fazer. Ao contrário do que se verifica em muitas abordagens aplicadas a este problema, neste trabalho é permitida a possibilidade de interromper o carregamento dos veículos eléctricos.

No capítulo 2 descreveremos o problema do planeamento do carregamento dos veículos eléctricos, será apresentada a sua formulação matemática segundo duas abordagens, discreta e contínua. Desenvolveremos um novo método baseado numa regra de despacho, para abordar este problema de forma discreta. No capítulo seguinte serão consideradas diversas extensões deste método abordando várias vertentes do problema. Por último, no capítulo 4, serão apresentados resultados numéricos para análise dos métodos apresentados.



# Capítulo 2

## Problema de planeamento de carregamento

Uma instância relevante do problema do carregamento inteligente de veículos eléctricos (*smart charging*) consiste em, dado um posto de transformação, um conjunto de postos de carregamentos e um conjunto de veículos a carregar nesses mesmos postos, determinar um plano dinâmico que nos indique quando carregar cada veículo e que apresente o menor desvio possível aos requisitos ou expectativas dos veículos a abastecer (por exemplo, a carga recebida ou o tempo de espera).

Por outras palavras, pretendemos implementar um sistema de gestão de carregamentos que dado um conjunto de veículos que necessitam de ser carregados, nos indique como, em cada instante e sem exceder a energia disponível no posto de transformação, devemos distribuir a energia por estes veículos, de modo a que todos os requisitos sejam satisfeitos, isto é, cada veículo receba a energia que necessita ao seu carregamento dentro do prazo estipulado. Caso isto não seja possível, pretendemos encontrar uma resposta o mais satisfatória possível.

A abordagem do problema vai ser feita de uma forma discreta. Para esse efeito, consideramos que o tempo é dividido em instantes temporais. E, portanto, o problema traduz-se em saber em que instantes temporais carregam os diversos veículos.

### 2.1. Formulação discreta

O problema pode ser modelado matematicamente em forma de problema de optimização. Para efeito consideremos as seguintes definições e notações:

- $K$  - número de veículos que necessitam de ser abastecidos;
- $C_i$  - número de instantes necessários para o carregamento do veículo  $i$ ;
- $T_i$  - número de instantes disponíveis para o carregamento do veículo  $i$ ;

- $P$  - energia disponível, isto é, número máximo de veículos que podem ser abastecidos simultaneamente.

Obviamente,  $T_i \geq C_i$ ,  $i = 1, \dots, K$ , caso contrário seria impossível carregar totalmente o veículo  $i$ .

O problema traduz-se por determinar variáveis binárias  $Z_{ij} \in [0, 1]^{T_i}$  tais que:

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o veículo } i \text{ carrega no instante } j \\ 0 & \text{se caso contrário} \end{cases}$$

que satisfaça as seguintes restrições:

$$\sum_{j=1}^{T_i} Z_{ij} = C_i, \quad i = 1, \dots, K; \tag{2.1}$$

$$\sum_{i=1}^k Z_{ij} \leq P, \quad j = 1, \dots, \max\{T_i : i = 1, \dots, K\}. \tag{2.2}$$

O conjunto de restrições (2.1) garante que o número de instantes em que o veículo  $i$  é abastecido é exactamente o número de instantes necessários para o seu carregamento. Enquanto que o conjunto (2.2) assegura que num instante temporal o número de veículos que estão a ser abastecidos não é superior ao número máximo que pode carregar em cada instante, isto é,  $P$ .

Dado a inexistência de função objectivo este problema de optimização reduz-se a um problema de admissibilidade.

A título de exemplo, consideremos que pretendemos carregar 3 veículos, cujos instantes disponíveis e necessários ao carregamento são  $T=(4,3,5)$  e  $C=(2,2,3)$ , respectivamente, e que  $P=2$ , ou seja, em cada instante, apenas podem carregar 2 veículos. Nas figuras 2.1 e 2.2 apresentamos dois possíveis planos de carregamento.

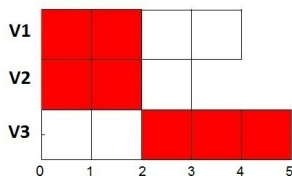


Figura 2.1: Plano 1

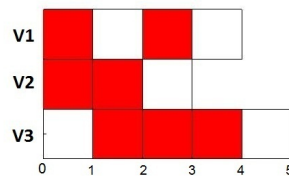


Figura 2.2: Plano 2

Observando o Plano 1 (Figura 2.1), vemos que os veículos V1 e V2 carregam nos instantes 1 e 2 e o veículo V3 carrega nos instantes 3, 4 e 5. Por outro lado, no Plano 2 (Figura 2.2), no instante 1 carregam os veículos V1 e V2, no instante 2 carregam



os veículos V2 e V3, já no instante 3 carregam os veículos V1 e V3 e por fim, no instante 4 carrega apenas o V3.

## 2.2. Método sem interrupções

A forma mais convencional de resolução deste problema consiste no método sem interrupções. Este método comporta-se exactamente como um sistema de lista de espera. No momento da chegada de um veículo a um posto de carregamento, se for possível efectuar o seu carregamento sem exceder a energia disponível no posto de transformação, dá-se logo início ao carregamento do veículo. Caso contrário, o veículo aguarda até que haja energia disponível e, nesse momento, procede-se ao carregamento. Desta forma o carregamento é realizado de uma forma contínua, isto é, sem interrupções. Por exemplo, o Plano 1 (Figura 2.1) é um carregamento sem interrupções.

Porém, este método não é o mais eficaz em termos de gestão de carregamento, uma vez que não satisfaz requisitos que doutra forma poderiam ser satisfeitos.

Consideremos, a título de exemplo que no sistema estão 3 veículos que necessitam de carregar e que a energia disponível é 2 e os instantes disponíveis e necessários são  $T=(3,3,3)$  e  $C=(2,2,2)$ , respectivamente. Não é possível obter um plano de carregamento sem interrupções, no entanto é possível encontrar um plano que satisfaça este requisitos se permitirmos a interrupção do carregamento, como é mostrado na Figura 2.3.

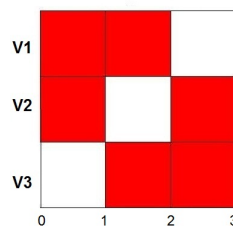


Figura 2.3: Plano possível

Desta forma, torna-se vantajoso considerarmos a possibilidade de interrupções, que são traduzidas por um “ligar/desligar” do carregamento. Em termos de gestão de carregamento, sucede que num dado momento vamos interromper o carregamento de um veículo para realizarmos o carregamento de outro veículo que se encontre no sistema, efectuando assim uma “troca”.

### 2.3. Job Shop Scheduling

O problema de calendarização do carregamento de veículos eléctricos é uma variante de um problema clássico de escalonamento de tarefas conhecido por *Job Shop Scheduling Problem* (JSSP).

Um JSSP consiste num conjunto de  $N$  tarefas a serem processadas num conjunto de  $M$  máquinas, sendo que uma máquina apenas pode processar uma tarefa de cada vez. O processamento de uma tarefa numa máquina é designado por operação. Relativamente a cada tarefa  $n$  possuímos a seguinte informação:

- Tempo de processamento,  $p_{mn}$ : tempo que a tarefa  $n$  demora a ser executada na máquina  $m$ ;
- Data de início,  $r_n$ : instante em que a tarefa  $n$  chega ao sistema para ser processada, isto é, o tempo mais cedo possível que a tarefa  $n$  pode começar a ser processada;
- Data de vencimento,  $d_n$ : instante prometido para completar a tarefa  $n$ ;

Pretendemos determinar valores  $S_{mn}$  e  $C_{mn}$  respectivamente, os instantes de início e fim de processamento da tarefa  $n$  na máquina  $m$ , verificando:

$$C_{mn} \leq d_n; \quad (2.3)$$

$$S_{mn} \geq r_n; \quad (2.4)$$

$$]S_{m_1,n}, C_{m_1,n}[ \cap ]S_{m_2,n}, C_{m_2,n}[ = \emptyset \text{ se } m_1 \neq m_2; \quad (2.5)$$

$$]S_{m,n_1}, C_{m,n_1}[ \cap ]S_{m,n_2}, C_{m,n_2}[ = \emptyset \text{ se } n_1 \neq n_2; \quad (2.6)$$

$$C_{mn} - S_{mn} = p_{mn}. \quad (2.7)$$

As inequações (2.3) e (2.4) asseguram respectivamente que a tarefa  $n$  na máquina  $m$  tem que ser completada no tempo prometido e que só é iniciada após a sua chegada ao sistema. As equações (2.5) e (2.6) garantem respectivamente que uma tarefa não está a ser processada por duas máquinas diferentes e que não são processadas duas tarefas diferentes na mesma máquina no mesmo intervalo de tempo. A equação (2.7) certifica que o tempo decorrido entre o início e o fim da tarefa  $n$  na máquina  $m$  é exactamente o tempo de processamento da tarefa  $n$  na máquina  $m$ .

O tempo de conclusão das tarefas é designado por  $C_{max} = \max\{C_{mn}, m = 1, \dots, M, n = 1, \dots, N\}$ .

O objectivo de um JSSP é determinar uma calendarização do processamento das tarefas. Podendo ter em conta vários objectivos, sendo o mais comum o de minimizar o tempo da calendarização, isto é, minimizar  $C_{max}$ . Outros objectivos são descritos por Pinedo [14] e French [8].

Consideremos o exemplo em que o sistema possui 2 tarefas a serem executadas em 2 máquinas. Na Tabela 2.1 é apresentado o tempo de processamento de cada tarefa em cada máquina.

Tarefas \ Máquinas	1	2
1	1	2
2	3	2

Tabela 2.1: Tempos de processamento

Relativamente aos tempos de processamento, analisando a Tabela 2.1 observamos que, por exemplo, o tempo de processamento da tarefa 2 na máquina 1 é 3, isto é,  $p_{12} = 3$ . Quanto aos restantes tempos de processamento temos  $p_{11} = 1$ ,  $p_{21} = 1$  e  $p_{22} = 2$ .

Vejamos duas formas de calendarizar este problema:

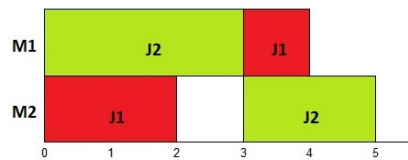


Figura 2.4: Calendarização 1



Figura 2.5: Calendarização 2

Por exemplo, na calendarização 1 (Figura 2.4), na máquina 1 primeiro é processada a tarefa 2 e por fim a tarefa 1, a máquina 2 inicialmente processa a tarefa 1, depois durante um instante encontra-se parada e por fim processa a tarefa 2. A paragem da máquina 2 advém do facto de naquele instante não existir nenhuma tarefa que possa ser processada nesta máquina uma vez que a tarefa 2 ainda está a ser executada na máquina 1. Em ambas as calendarizações  $C_{max} = 5$ .

Uma característica importante do problema de calendarização é a configuração das máquinas. Existem vários tipos de configurações, no entanto, no que se segue, só iremos abordar o modelo de máquinas em paralelo, contrariamente ao considerado no exemplo anterior. Mais modelos são abordados por Pinedo [14]. O modelo de máquinas em paralelo consiste em que as  $M$  máquinas sejam idênticas e, como tal,

cada operação pode ser realizada em qualquer uma das máquinas e conseqüentemente o tempo de processamento da tarefa  $n$  é o mesmo independentemente da máquina escolhida. Desta forma,  $p_{mn}$  pode ser simplificado para  $p_n$ , uma vez que o tempo de processamento apenas depende da tarefa.

O processamento de tarefas tem diversas características e é muitas vezes sujeito a determinadas restrições. Existem várias restrições (Pinedo [14]), uma bastante relevante para este trabalho é a restrição de precedências. Esta restrição impõe que uma tarefa apenas pode começar quando um determinado conjunto de tarefas tiverem sido completadas.

O problema de calendarização do carregamento de veículos eléctricos pode ser interpretado como um JSSP. Para tal efeito, basta considerarmos que as máquinas representam a energia disponível e, portanto, o sistema tem  $P$  máquinas e é um modelo de máquinas em paralelo dado que os carregamentos são todos efectuados da mesma forma. Uma tarefa é o carregamento de um veículo eléctrico com a duração de um instante temporal, desta forma, o número de tarefas é  $\sum_i C_i$ , uma vez que o veículo  $i$  terá que carregar durante  $C_i$  instantes. Portanto vamos definir cada tarefa como  $n = (i, j)$ , que corresponde ao  $j$ -ésimo carregamento do veículo  $i$ . Como não podemos efectuar o  $j$ -ésimo carregamento do veículo  $i$  sem realizarmos o carregamento  $j - 1$ , isto é, a tarefa  $(i, j - 1)$  precede a tarefa  $(i, j)$  encontramos assim, perante um problema com relações de precedências, em que o grafo de precedências é uma união disjunta de segmentos orientados.

Como abordamos o problema de forma discreta, o tempo de processamento de cada tarefa é  $p_{(i,j)} = 1$ , que corresponde a um tempo de carregamento de um instante. Como os veículos inicialmente se encontram todos no sistema temos que  $r_{(i,1)} = 0$ ,  $i = 1, \dots, K$  e  $d_{(i,C_i)} = T_i$ ,  $i = 1, \dots, K$ , uma vez que para satisfazer os requisitos dos veículos no sistema, em  $T_i$  o veículo  $i$  tem que estar totalmente carregado.

Alguns problemas de escalonamento são de fácil resolução. Muitos deles podem ser formulados com programas lineares que podem ser facilmente resolvidos através de algoritmos eficientes (French [8]). Estes algoritmos eficientes são usualmente referidos como algoritmos de tempo polinomial. No entanto, muitos problemas de calendarização são *NP-Hard* (Jain *et al.* [10]) sendo bastante difíceis de resolver. Não é possível formulá-los como programas lineares e nenhuma regra ou algoritmo simples determinam soluções óptimas em tempo computacional limitado. Para dar resposta a este problema, para além dos algoritmos de procura baseados nos méto-

dos de *Branch and Bound* abordados por Pinedo *et al.* [15], foram desenvolvidos métodos heurísticos e algoritmos de aproximação (abordados por Pinedo *et al.* [15], Yamada *et al.* [20], Dell’Amico *et al.* [7] e Adams *et al.* [1]). Os mais comuns são as regras de despacho (ver Pinedo *et al.* [15] e Blackstone *et al.* [3]) que podem ser simples ou compostas.

Por regra de despacho entende-se uma regra que concede prioridade a todas as tarefas que estão em espera para serem processadas numa máquina. Quando uma máquina está livre, a regra de despacho selecciona a tarefa com maior prioridade de entre as tarefas que estão à espera. O modo de escolha pode considerar os dados das tarefas, da máquina e também o tempo corrente, o que permitiu a Pinedo *et al.* [15] classificá-las de várias formas. Uma classificação possível é a distinção entre regras estáticas e regras dinâmicas, sendo que as primeiras não são dependentes do tempo enquanto que as segundas são. Um exemplo de uma regra dinâmica é a regra da folga mínima, que ordena as tarefas pela folga restante, sendo esta folga definida por  $\max(d_n - p_n - t, 0)$  em que  $t$  é o tempo corrente. Portanto, por folga entende-se o tempo que sobra se à data de vencimento ( $d_n$ ) retirarmos o tempo de execução ( $p_n$ ) e o tempo corrente ( $t$ ).

Na secção seguinte vamos considerar uma variação desta regra de despacho, sendo que para o problema de calendarização do carregamento de veículos eléctricos mostraremos que esta regra é um método determinístico de solução e não apenas uma heurística.

## 2.4. Método da Folga

Com o objectivo de dar resposta ao problema de gestão de carregamento, vamos agora introduzir um método de calendarizar os carregamentos em que seja permitido interrompê-los de forma a satisfazer o máximo de requisitos possíveis. Denominaremos este método por método da folga.

Como folga entenda-se a diferença entre o número de instantes disponíveis e o número de instantes necessários ao abastecimento de um veículo, isto é,

$$F_i = T_i - C_i, \quad i = 1, \dots, K.$$

Portanto, a folga é o número de instantes em que o veículo  $i$  não abastecerá entre os instantes ainda disponíveis ao seu carregamento.

O método da folga consiste em que em cada instante temporal sejam carregados os  $P$  veículos com menor folga. Após esse instante, o número de instantes necessários

diminui em 1 para os veículos que foram carregados e permanece o mesmo para os restantes. A folga dos veículos que não foram carregados vai diminuir em 1 pois estes possuem menos um instante disponível para abastecer.

O processo termina quando os instantes necessários para todos os veículos forem zero, isto é, todos os veículos estiverem carregados, ou quando não existirem mais momentos disponíveis para o carregamento e ainda existirem veículos no momento a necessitar de carregar, sendo que neste caso, o problema não tem solução.

**Teorema 2.8.** *Se existir uma solução para o plano de carregamento, o método da folga determina uma.*

### Demonstração:

Para provarmos que se este método não encontrar uma solução, então não existe uma solução para o problema, basta demonstrar que qualquer solução pode ser transformada numa solução obtida por este método.

Consideremos uma qualquer solução para o problema do planeamento de carregamento.

No instante  $j$ , se os  $P$  veículos com menor folga forem os que estiverem a carregar então está de acordo com o método da folga. Caso contrário, sejam  $i_1$  e  $i_2$ , respectivamente, o veículo com maior folga que está a carregar no instante  $j$  e o veículo com menor folga que não está a carregar no instante  $j$ .

Consideremos, ainda, dois conjuntos,  $F1$  e  $F2$  que são os conjuntos dos instantes após o instante  $j$  e até aos instantes  $T_{i_1}$  e  $T_{i_2}$ , respectivamente, em que os veículos  $i_1$  e  $i_2$ , respectivamente, não estão a ser carregados. Isto é,

$$F1 = \{j < l \leq T_{i_1} : Z_{i_1l} = 0\},$$

$$F2 = \{j < l \leq T_{i_2} : Z_{i_2l} = 0\}.$$

Como o veículo  $i_1$  possui mais folga que o veículo  $i_2$ , no instante  $j$ , temos que  $\#F1 > \#F2$ . Então,  $\exists l \in F1 : l \notin F2$ , isto é, ou  $l > T_{i_2}$  ou  $Z_{i_2l} = 1$ . O que cria duas situações possíveis:

1. Existe um instante  $l$  depois de  $j$  e antes de  $T_{i_1}$  em que o veículo  $i_2$  está a ser carregado e o veículo  $i_1$  não, isto é  $\exists l \in ]j, T_{i_1}] : Z_{i_1l} = 0$  e  $Z_{i_2l} = 1$  Portanto, basta realizar-se a seguinte troca: o veículo  $i_2$  carrega no instante  $j$  e o veículo  $i_1$  carrega no instante  $l$ .

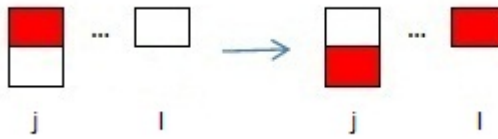
Inicialmente:	Após a troca:
$Z_{i_1j} = 1$ $Z_{i_1l} = 0$	$Z_{i_1j} = 0$ $Z_{i_1l} = 1$
$Z_{i_2j} = 0$ $Z_{i_2l} = 1$	$Z_{i_2j} = 1$ $Z_{i_2l} = 0$



2. O instante após o instante  $j$  em que o veículo  $i_1$  não está simultaneamente a carregar com o veículo  $i_2$  é um instante  $l$  após o instante  $T_{i_2}$ . Neste caso temos ainda duas hipóteses:

(a) Se no instante  $l$  o número de veículos a carregar é inferior a  $P$ , então

Inicialmente:	Após a troca:
$Z_{i_1j} = 1$ $Z_{i_1l} = 0$	$Z_{i_1j} = 0$ $Z_{i_1l} = 1$
$Z_{i_2j} = 0$	$Z_{i_2j} = 1$



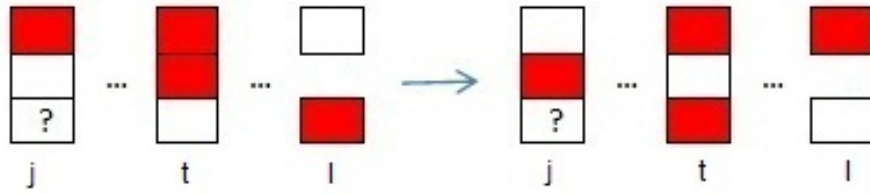
(b) No instante  $l$  estão  $P$  veículos a ser abastecidos.

Como o veículo  $i_1$  ainda necessita de carga, existe um instante  $t$  após o instante  $j$  e antes do instante  $l$  em que ambos os veículos estão a ser carregados (caso contrário estaríamos no caso 1).

Como no instante  $t$  temos 2 veículos ( $i_1$  e  $i_2$ ) a carregar que não carregam em  $l$  e dado que em  $l$  estão  $P$  veículos a carregar, então existe um veículo  $i_3$  que está a carregar em  $l$  e não está a carregar em  $t$ . Uma vez que se todos os veículos que carregam em  $l$  carregassem em  $t$ , em  $t$  teríamos  $P + 2$  veículos a abastecer.

Portanto,

Inicialmente:	Após a troca:
$Z_{i_1j} = 1$ $Z_{i_1t} = 1$ $Z_{i_1l} = 0$	$Z_{i_1j} = 0$ $Z_{i_1t} = 1$ $Z_{i_1l} = 1$
$Z_{i_2j} = 0$ $Z_{i_2t} = 1$ $Z_{i_2l} = 0$	$Z_{i_2j} = 1$ $Z_{i_2t} = 0$ $Z_{i_2l} = 0$
$Z_{i_3t} = 0$ $Z_{i_3l} = 1$	$Z_{i_3t} = 1$ $Z_{i_3l} = 0$



Por indução sobre o número de carregamentos que não cumprem a regra de despacho e sobre os instantes, realizam-se estas trocas até obtermos uma solução determinada pelo método da folga. ■

NOTA: A regra da folga não está unicamente definida, pois existem diversas hipóteses de escolher os veículos a carregar no caso de vários possuírem a mesma folga. Assim, à partida, o facto de existir uma solução dada por um método da folga não garante que qualquer método da folga determine uma solução. No entanto, facilmente se verifica a partir da demonstração que o teorema anterior é válido para qualquer método da folga.

Consideremos que no sistema encontram-se 4 veículos que necessitam de ser carregados e que apenas podemos carregar 2 em cada instante,  $P = 2$ , e que os instantes disponíveis e necessários são respectivamente,  $T = (3, 2, 3, 3)$  e  $C = (2, 1, 2, 1)$ . Observemos agora a forma como o método da folga determina uma calendarização, apresentada na Figura 2.6.

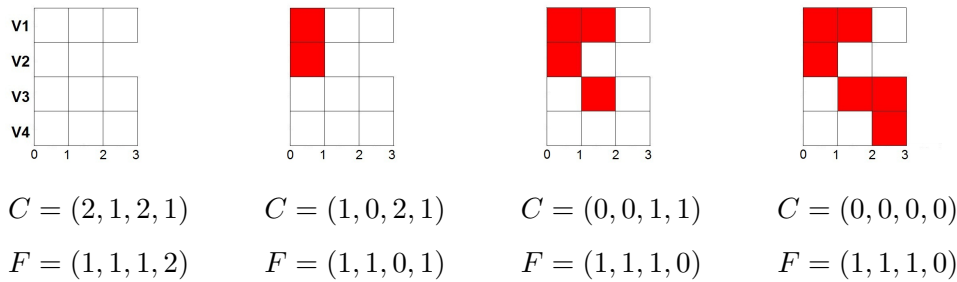


Figura 2.6: Comportamento método da folga

Analisando a figura 2.6 observamos que no primeiro instante os veículos  $V1$ ,  $V2$  e  $V3$  são os veículos que possuem a menor folga, carregando apenas os veículos  $V1$  e  $V2$  uma vez que apenas é possível carregar 2 veículos por instante. Como os veículos  $V1$  e  $V2$  foram carregados no primeiro instante os seus instantes necessários diminuem em 1, sendo que o veículo  $V2$  termina o seu carregamento. A folga dos veículos  $V3$  e  $V4$  diminui em 1 uma vez que estes não carregaram no primeiro instante.

Vejamos agora um exemplo em que no sistema encontram-se 6 veículos. Seja  $T = (22, 24, 25, 17, 22, 18)$  e  $C = (19, 4, 16, 13, 8, 8)$ , respectivamente, os instantes



disponíveis e necessários para o carregamento dos veículos. Consideremos ainda que em cada instante no máximo 3 veículos podem ser carregados,  $P = 3$ .

Pelo método da folga, obtemos o plano de carregamento ilustrado na Figura 2.7.

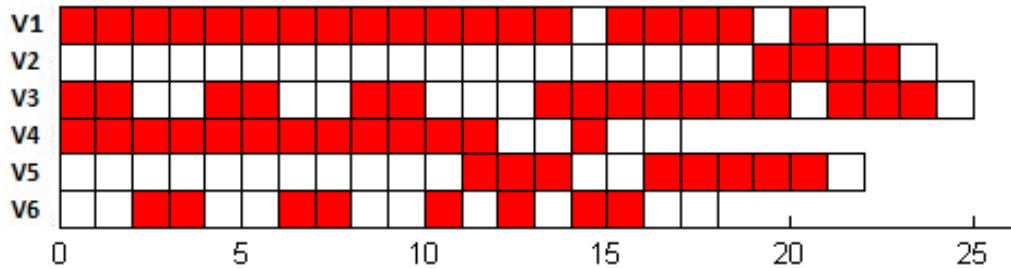


Figura 2.7: Plano obtido pelo método da folga

### 2.4.1. Complexidade

É do senso comum que o tempo de resposta do serviço de carregamento deve ser o menor possível por forma a informar o utilizador da disponibilidade de carregamento para o seu veículo. Perante isto, é necessário proceder ao estudo da complexidade, isto é, o tempo de execução do método da folga.

O seguinte pseudo-código traduz o método da folga:

Para cada instante  $j$ :

Para cada veículo  $i$  (ordenados por ordem crescente de folga):

- Se ainda não foram abastecidos  $P$  veículos e  $C_i \neq 0$  então o veículo  $i$  é carregado e  $C_i = C_i - 1$  (se  $C_i = 0$  então o veículo  $i$  é retirado da lista).
- Se já foram abastecidos  $P$  veículos e ainda existem veículos para carregar então  $F_i = F_i - 1$ , isto é, a folga do veículo  $i$  diminui uma vez que não foi carregado
- Se  $F_i < 0$  e  $C_i > 0$ : Sai e devolve impossível.

Reordenar  $F$ .

**Teorema 2.9.** *A complexidade do método da folga é*

$$O\left(\sum_{i=1}^K T_i\right).$$

**Demonstração:**

Seja  $m_j$  o número de veículos que ainda necessitam de carregar no instante  $j$ .

Em cada instante temos as seguintes operações:

- actualizar  $C$  e  $F \rightarrow O(m_j)$ ;
- reordenar  $F$  (fusão de duas listas ordenadas de tamanho  $m_j$ )  $\rightarrow O(m_j)$ ;

Uma vez que no intervalo  $[C_i, T_i]$  eliminamos o veículo  $i$  (caso contrário o veículo  $i$  não carregaria e não possuíamos uma solução), o número de veículos em cada instante depende apenas do instante que estamos a considerar. Como ao fim de  $T_i$  temos no máximo  $K - i$  veículos, a complexidade do método da folga é

$$O\left(\sum_{i=1}^K T_i\right).$$

■

Vejam agora uma comparação entre o método da folga e a utilização do solver de programação binária, bintprog do MATLAB, baseada nos tempos de execução dos programas.

Consideramos  $K$  o número de veículos e  $\max T$  o máximo valor possível para os tempos disponíveis. Geramos aleatoriamente os valores para  $T$ ,  $C$  e  $P$  e calculamos o tempo (em segundos) de resolução do problema usando o método da folga e o bintprog. Repetimos este processo 10 vezes e procedemos ao cálculo da média dos tempos. Apresentamos os resultados obtidos na Tabela 2.2.

K	maxT	Tempo médio folga	Tempo médio bintprog
10	100	0.00641	0.68579
10	150	0.00705	1.38130
10	200	0.00872	2.31978
20	100	0.00971	2.26638
20	150	0.00988	3.75998
20	200	0.01001	5.81523
50	100	0.01029	12.6801
50	150	0.01216	24.8173
50	200	0.01676	38.7049

Tabela 2.2: Tempos de comparação

Na Tabela 2.2 observamos que mesmo com valores elevados de  $K$  e  $T$ , o tempo de execução do problema através do método da folga é bastante rápido, não chega a

demorar meio segundo, o mesmo já não acontece se recorrermos ao bintprog, solver de programação binária. Ao recorrermos a este método de resolução concluímos que o tempo de execução aumenta consideravelmente com o aumento de  $K$  e  $T$ .

## 2.5. Abordagem contínua

No âmbito do projecto desenvolveu-se ainda uma abordagem contínua para dar solução ao problema de calendarização do carregamento dos veículos. Esta abordagem passa por dividir o tempo de carregamento dos veículos em intervalos, sendo que as amplitudes desses intervalos são definidas pelos tempos disponíveis para o carregamento dos veículos. A ideia é determinar as percentagens de tempo em que cada um dos veículos eléctricos carrega nesses mesmos intervalos.

Para esta abordagem, supõe-se que os veículos se encontram ordenados por ordem crescente dos seus tempos disponíveis para o carregamento, isto é,  $T_1 \leq T_2 \leq \dots \leq T_K$ , por convenção define-se ainda  $T_0 = 0$ .

As variáveis de decisão do problema são  $y_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, K$ ,  $j = 1, \dots, i$  que representam a percentagem do intervalo de tempo  $[T_{j-1}, T_j]$  em que o  $i$ -ésimo veículo se encontra efectivamente a carregar. Deste modo, a versão contínua do problema pode ser formulado da seguinte forma:

$$\sum_{j=1}^i y_{ij}(T_j - T_{j-1}) = C_i, \quad i = 1, \dots, K; \quad (2.10)$$

$$\sum_{i=j}^K y_{ij} \leq P, \quad j = 1, \dots, K; \quad (2.11)$$

$$y_{ij} \in [0, 1], \quad i = 1, \dots, K, \quad j = 1, \dots, i. \quad (2.12)$$

O conjunto de restrições (2.10) garante que todos os veículos carregam exactamente a quantidade que necessitam. O conjunto de restrições (2.11) assegura que a energia total utilizada no carregamentos dos veículos é não superior à energia disponível  $P$ . Estes conjuntos de restrições correspondem, respectivamente, aos conjuntos (2.1) e (2.2) da abordagem discreta do problema. Estamos, portanto, perante um problema de Programação Linear e, tal como na abordagem discreta, devido a inexistência de uma função objectivo o problema reduz-se a um problema de admissibilidade.

Uma solução admissível para este problema tende a distribuir a energia igualmente pelos intervalos de tempo enquanto que o desejado seria dar prioridade aos

primeiros intervalos de forma a completar o carregamento dos veículos o mais cedo possível. Uma maneira de abordar esta ideia passa por introduzir uma função objectivo que dê progressivamente menos peso à energia carregada em intervalos posteriores. Uma tal função é dada por

$$\max \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^i \frac{1}{2^i} y_{ij} (T_j - T_{j-1}),$$

sendo que a ideia de atribuir mais relevância à energia utilizada nos primeiros momentos do plano é traduzida por atribuir pesos com potências de 2 em denominador.

Consideremos o exemplo apresentado na secção (2.4) ilustrado na Figura 2.7, em que no sistema se encontram 6 veículos com tempos disponíveis e necessários,  $T = (22, 24, 25, 17, 22, 18)$  e  $C = (19, 4, 16, 13, 8, 8)$  respectivamente, e a energia disponível é  $P = 3$ . Correndo a abordagem contínua, obtemos os resultados apresentados na Figura 2.8 para a percentagem de carregamento de cada veículo em cada intervalo.

<b>V4</b>	76,47%					
<b>V6</b>	41,18%	100%				
<b>V1</b>	82,35%	100%	100%			
<b>V5</b>	17,65%	100%	100%			
<b>V2</b>	0%	0%	100%	0%		
<b>V3</b>	83,25%	0%	0%	100%	0%	
	0	17	18	22	24	25

Figura 2.8: Percentagem de carregamento em cada intervalo

Observamos que por exemplo, o veículo  $V4$  carrega 76,47% do primeiro intervalo e o veículo  $V6$  efectua o seu carregamento durante 41,18% do primeiro intervalo e durante o segundo intervalo completo. Notemos que em todos os intervalos a energia total utilizada nos carregamentos é não superior a 3.

Observamos que, ao contrário do que acontece na abordagem discreta, uma solução obtida do problema anterior não é a resposta pretendida, uma vez que não apresenta qualquer informação sobre os instantes em que cada veículo está ou não a carregar. Deste modo, para obter um plano de carregamento, é ainda necessário converter a solução obtida através da resolução do problema anterior numa calendarização, isto é, num número discreto de pontos que indiquem quando “ligar” e “desligar” cada um dos carregamentos.

Consideremos o seguinte método de conversão. Para cada subplano tem-se a informação da quantidade de energia que cada veículo carregou. Começamos por

carregar o primeiro veículo. O segundo veículo começa a carregar no momento seguinte do subplano em que o veículo anterior não está a carregar, caso chegue ao final do tempo disponível e ainda não carregou o total desse subplano, começa a carregar no início do subplano. Repete-se este processo para todos os veículos. Caso algum veículo termine o seu carregamento no final do subplano, o veículo seguinte começa a carregar no início do subplano.

Na Figura 2.9 encontramos o plano obtido através deste método de conversão (comparar com a Figura 2.7 do método da folga).

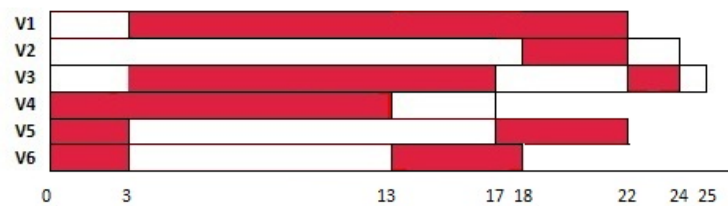


Figura 2.9: Plano de carregamento

Assim, vemos que para o subplano de  $[0, T_4 = 17]$  o veículo  $V4$  carrega  $(0, 7647 \times 17)$  unidades do tempo, começando no início e acabando no instante 13. o veículo  $V6$  (que segue a seguir ao veículo  $V4$  se os considerarmos ordenados por  $T$ ) carrega  $(0, 4118 \times 17)$  unidades do tempo, começando no instante 14 e carrega até ao instante 17, como ainda não completou a sua carga desse subplano carrega no início do plano até ao instante 3. Procedendo de igual forma para os restantes veículos ( $V1$ ,  $V5$ ,  $V2$  e  $V3$ ) e para os restantes intervalos.

Este método da abordagem contínua poderá ser encontrado com mais promenor num artigo em preparação com Xavier Fernandes e João Gouveia.



## Capítulo 3

# Extensões do Método da Folga

### 3.1. Não admissibilidade

Uma questão importante relativamente ao problema de planeamento de carregamentos é o procedimento a tomar caso não seja possível obter um plano de carregamento que satisfaça todos os requisitos. Sobre este ponto de vista, várias opções podem ser tomadas em conta.

Nesta secção vamos abordar algumas opções para determinar uma melhor resposta no caso de não ser possível determinar um plano de carregamento. Para tal, apresentaremos dois procedimentos alternativos: alterar os requisitos de todos os veículos no sistema ou apenas alterar os dados do último veículo que entrou no sistema.

#### 3.1.1. Folgas negativas

Face à não admissibilidade do problema, uma hipótese a considerar é a hipótese de alterarmos os tempos disponíveis que os veículos necessitam de permanecer no sistema, por forma a ser possível carregar todos os veículos.

Uma pequena alteração do método da folga, permite-nos encontrar uma resposta a este problema. Relembremos que o método da folga tem duas condições de paragem: num dado instante, os instantes necessários ao carregamento são todos zeros e portanto, os veículos estão totalmente carregados, o que nos garante a existência de um plano de carregamento. A outra condição de paragem é a que nos conduz à inadmissibilidade do problema, que se traduz por, num dado instante, um veículo necessitar ainda de carregar mas já ter esgotado os instantes disponíveis ao seu carregamento. Pela noção de folga, esta situação acontece quando, um veículo possui folga negativa e os seus instantes necessários ao carregamento são diferentes de zero. Portanto, por folga negativa entendemos a situação em que o veículo necessita de carregar mais instantes do que aqueles que tem disponíveis.

Observemos um exemplo que traduz esta situação. Consideremos que no sistema

encontram-se 3 veículos que necessitam de carregar cujos instantes disponíveis e necessários ao carregamento são, respectivamente,  $T = (3, 3, 3)$  e  $C = (3, 2, 3)$ . Em cada instante apenas podemos carregar 2 veículos em simultâneo, isto é,  $P = 2$ .

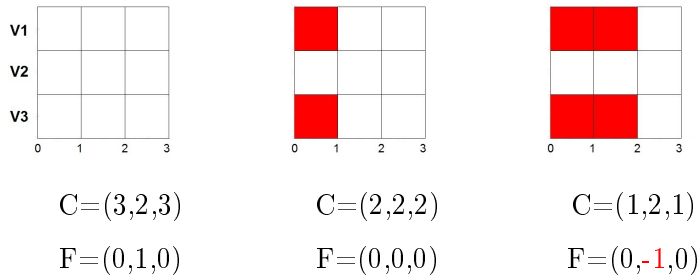


Figura 3.1: Comportamento método da folga

Observando a Figura 3.1 verificamos que é impossível determinarmos um plano de carregamento que satisfaça todos os requisitos, uma vez que no instante 3 o veículo  $V2$  necessita de carregar dois instantes mas só já tem um disponível para o fazer e, portanto, o que sucede é que tem um instante em falta, isto é traduzido pela folga ser  $-1$ .

Com o intuito de encontrar uma solução para o problema da não admissibilidade, basta permitir que o método considere folgas negativas. A ideia consiste em continuar o carregamento dos veículos mesmo que a sua folga seja negativa, isto é, os veículos já não tenham instantes disponíveis para carregar. Quando todos os veículos estiverem carregados, temos então o tempo mínimo que cada um deles necessita de permanecer no sistema por forma a pudermos obter um plano de carregamento.

De volta ao exemplo anterior, permitindo as folgas negativas, temos a situação apresentada na Figura 3.2.

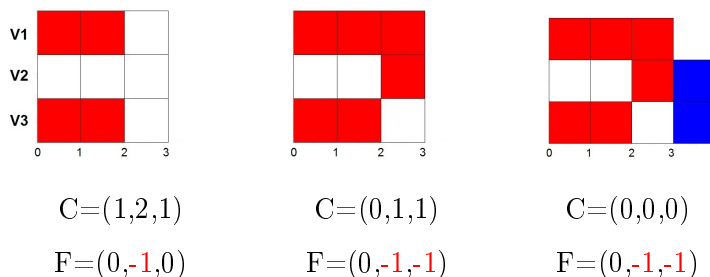


Figura 3.2: Comportamento do método da folga com folgas negativas

Concluimos que para ser possível carregar todos os veículos com este procedimento, é necessário que os veículos  $V2$  e  $V3$  permaneçam mais um instante cada um no sistema.

No que se segue, por penalização máxima de um plano de carregamento entende-



se o tempo máximo que um veículo tem que permanecer no sistema para além do tempo desejado.

**Corolário 3.1.** *No caso não admissível, o método da folga tem a menor penalização máxima.*

**Demonstração:**

Consideremos um problema não admissível. Seja  $X_{max}$  a menor penalização máxima, isto é, existe um plano de carregamento em que cada veículo espera no máximo  $X_{max}$  instantes para além do seu prazo pretendido (e para nenhum  $X_{max}$  menor existe tal plano). Então substituindo  $T$  por  $T' = T + X_{max}$  obtemos um problema admissível pelo que o método da folga determinará uma solução.

A adição de  $X_{max}$  não altera o comportamento do método da folga, uma vez, que esta alteração apenas provoca um aumento de  $X_{max}$  ao vector das folgas e, portanto, os veículos são carregados pela mesma ordem em ambos os problemas, e pelo teorema 2.8, o método da folga devolverá uma solução admissível. Ao subtrairmos  $X_{max}$  a  $T'$  (voltando ao problema não admissível), os veículos que não são carregados no seu tempo disponível, precisam no máximo  $X_{max}$  instantes adicionais, garantindo assim que o método da folga tem penalização máxima optimal. ■

### 3.1.2. Alterações ao último veículo

Apesar de apenas estarmos a considerar que no sistema se encontram um determinado número de veículos que precisam de ser carregados e o objectivo ser o de determinar um plano de carregamento que melhor satisfaça os requisitos de todos os veículos, a ideia subjacente é a de incorporar este procedimento num processo dinâmico. Este processo é caracterizado pela chegada de veículos ao sistema ao longo do tempo. A ideia passa por aquando a chegada de um veículo ao sistema informar o utilizador sobre se é possível carregar o seu veículo e caso não seja possível quais as alternativas que pode escolher. Desta forma, uma das hipóteses do caso não admissível será as de alterar os requisitos do último veículo de forma a ser possível obter um plano de carregamento e dar uma resposta ao utilizador. Esta resposta apresenta duas componentes: ou o veículo tem de permanecer mais alguns instantes no sistema ou apenas será possível carregar parte dos instantes necessários.

O método usado é similar em ambos os casos e é baseado no método da pesquisa binária. Analisemos primeiro o caso em que pretendemos encontrar o tempo mínimo

que o último veículo a chegar necessita de permanecer no sistema para que seja possível abastecer todos os veículos.

Inicialmente consideramos o intervalo  $[T(K), \max(T) + C(K)]$ , uma vez que sabemos que o tempo disponível que pretendemos encontrar é superior ao tempo dado pelo utilizador e é inferior a  $\max(T) + C(K)$ , uma vez que todos os outros veículos abastecem até  $\max(T)$  e portanto o veículo  $K$  abastece nos restantes instantes que são exactamente os instantes necessários ao seu abastecimento.

Seja  $a = T(K)$  e  $b = \max(T) + C(K)$ . Calcula-se o valor médio de  $[a, b]$  (arredondado) digamos,  $m$ , e se para esse valor for possível encontrar um plano de carregamento então  $b = m$ , caso contrário  $a = m$ . Repete-se o processo com o novo intervalo até a diferença entre os extremos do intervalo seja um, garantido assim que  $b$  é o tempo mínimo necessário para a obtenção de um plano de carregamento.

Para o caso em que pretendemos determinar o número de instantes máximo que o veículo pode carregar, consideramos o mesmo método mas começamos a procura com  $a = 0$ , que tornaria o problema admissível e  $b = C(K)$  que por hipótese torna o problema inadmissível.

Consideremos novamente o exemplo em que se encontram no sistema 3 veículos cujos instantes disponíveis e necessários ao carregamento são, respectivamente,  $T = (3, 3, 3)$  e  $C = (3, 2, 3)$  e, em cada instante apenas podemos carregar 2 veículos em simultâneo,  $P = 2$ .

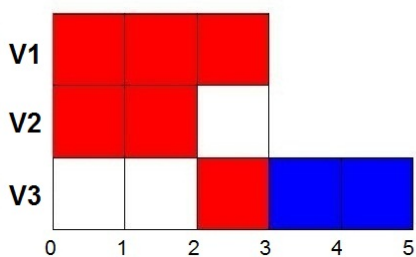


Figura 3.3: Plano de carregamento - alteração instantes disponíveis

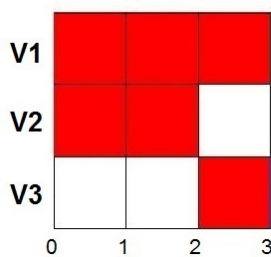


Figura 3.4: Plano de carregamento - alteração instantes necessários

Observamos que se alterarmos apenas os dados do último veículo (V3) temos que, ou o veículo permanece mais dois instantes no sistema do que pretendia (Figura 3.3) ou apenas será possível carregar um dos três instantes necessários (Figura 3.4).

### 3.2. Minimização de trocas

Os desgastes das baterias ocorrem especialmente durante os ciclos de cargas e descargas, pelo que estudos foram realizados para minimizar a degradação das baterias dos veículos eléctricos ( exemplos desses estudos foram realizados por Bashash *et al.* [2] e Peterson *et al.* [13]). No entanto este desgaste da bateria é mal compreendido não existindo modelos simples e fiáveis para o simular. Interrupções frequentes no carregamento podem contribuir para esse desgaste, pelo que o estudo da minimização de interrupções pode ser benéfico. Pretende-se portanto, minimizar as trocas, ou seja, minimizar o número de interrupções do carregamento do veículo ou o número de momentos de “ligar/desligar”, sendo o ideal 2, um momento de “ligar”, em que começa o carregamento e um momento de “desligar”, quando terminamos o carregamento.

Este problema traduz-se por

$$\text{minimizar } \sum |Z_{ij} - Z_{ij+1}| + Z_{i1} + Z_{iT_i}.$$

Atendendo às seguintes equivalências:

$$|Z_{ij} - Z_{ij+1}| \leq w_{ij} \Leftrightarrow -w_{ij} \leq Z_{ij} - Z_{ij+1} \leq w_{ij} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} Z_{ij} - Z_{ij+1} - w_{ij} \leq 0 \\ -Z_{ij} + Z_{ij+1} - w_{ij} \leq 0. \end{cases}$$

Temos, então, que o problema se traduz por minimizar  $\sum w_{ij} + Z_{i1} + Z_{iT_i}$ , sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{j=1}^{T_i} Z_{ij} = C_i, \quad i = 1, \dots, K; \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^K Z_{ij} \leq P, \quad j = 1, \dots, \max\{T_i : i = 1, \dots, K\}; \quad (3.3)$$

$$Z_{ij} - Z_{ij+1} - w_{ij} \leq 0; \quad (3.4)$$

$$-Z_{ij} + Z_{ij+1} - w_{ij} \leq 0. \quad (3.5)$$

Os dois primeiros conjuntos de restrições correspondem às restrições do problema original (2.1 e 2.2) e os dois últimos conjuntos de restrições advêm da minimização das trocas.

Na subsecção 2.4.1, observamos que resolver o problema original recorrendo a solvers gerais de programação binária, nomeadamente o bintprog do MATLAB, tornava-se bastante lento com o aumento do número de veículos no sistema e com o aumento do número de instantes que cada veículo permanecia no sistema.

Considerando que o problema de minimização de trocas é uma alteração do problema original, uma vez que acrescentamos restrições e função objectivo, é de esperar que a resolução deste problema seja ainda mais demorada do que a resolução do problema original. Na verdade, só é possível resolver este problema para instâncias  $K$  e  $T$  muito pequenas, na ordem das dezenas. Portanto, esta resolução não é eficaz, o que nos leva a recorrer a heurísticas.

Consideremos a seguinte heurística, para reajustar um plano de carregamento. Isto é, dado um plano de carregamento pretendemos reajustá-lo por forma a reduzir o número de interrupções.

Começemos por ordenar o plano por ordem crescente dos instantes disponíveis, seja  $TO$  o vector dos instantes disponíveis ordenados. De seguida, dividimos o plano de carregamento em subplanos, de 0 a  $TO_1$ , de  $TO_{i-1}$  a  $TO_i$  para  $i = 2, \dots, K$ . Para cada subplano temos a informação do número de instantes que cada veículo carregou. Notemos que no subplano  $[TO_{i-1}, TO_i]$  apenas  $K - (i - 1)$  veículos estão a carregar, uma vez que o plano se encontra ordenado por ordem crescente dos instantes disponíveis e portanto, após o instante  $TO_{i-1}$ ,  $K - (i - 1)$  já estão totalmente carregados, caso contrário não teríamos um plano de carregamento.

A ideia é reorganizar o subplano para que no máximo, para cada veículo haja 4 momentos de “ligar/ desligar”, isto é, o carregamento de cada veículo em cada subplano é interrompido no máximo uma vez. O procedimento é bastante simples e análogo ao usado na abordagem contínua (seccão 2.5). Começamos por carregar o primeiro veículo. O segundo veículo começa a carregar no primeiro instante do subplano em que o veículo anterior não está a carregar, caso chegue ao final dos instantes disponíveis e ainda não carregou o total desse subplano, começa a carregar no primeiro instante. Repete-se este processo para todos os veículos. Caso algum veículo termine o seu carregamento no último instante do subplano, o veículo seguinte começa a carregar no primeiro instante do subplano.

Deste modo, conseguimos garantir que o número de momentos de “ligar/ desligar” para o veículo  $i$  é não superior a  $4 \times i$ , quando consideramos os veículos ordenados por instantes disponíveis.

Para melhor ilustrarmos esta situação consideremos o exemplo da Figura 2.7 (seccão 2.4), o plano de carregamento com este pós-processamento de reajustamento é apresentado na Figura 3.5.

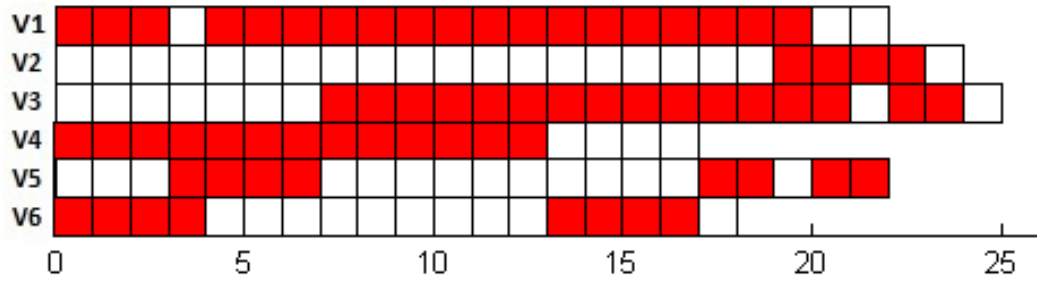


Figura 3.5: Plano de carregamento

Observando o novo plano de carregamento representado na Figura 3.5, concluímos que todos os veículos apresentam, no máximo, 4 momentos de “ligar/ desligar” em cada subplano. Comparando os planos obtidos com e sem pós-processamento respectivamente, Figuras 2.7 e 3.5, verificamos uma redução de momentos de “ligar/ desligar”, por exemplo, estes momentos dos veículos *V4* e *V6* reduziram de 10 para 4. O número médio de momentos de “ligar/ desligar” desce de 5,7 para 2,3 com o reajustamento do problema original.

É também observável que o número total de momentos de “ligar/ desligar” não ultrapassa os  $4 \times i$  para o veículo *i*. Por construção deste novo plano de carregamento através deste reajustamento, no subplano *i*, o veículo *i* apresenta apenas 2 momentos de “ligar/ desligar”, uma vez que no subplano *i*, o processo começa com o veículo *i*, e o carregamento deste é feito sem interrupções neste subplano. Desta forma, o número máximo de momentos de “ligar/ desligar” para o veículo *i* é, na verdade,  $2 + 4 \times (i - 1)$ .

### 3.3. Sistema de reserva de energia

A ideia do planeamento de carregamento é de encontrar uma forma de melhor satisfazer os requisitos dos utilizadores. Como tal, um aspecto interessante a considerar é um sistema de classificação que distinga os utilizadores e respectivos veículos entre si. Para o efeito, consideremos a existência de dois tipos de utilizadores/ veículos:

- Normal: Utilizador sem regalias;
- Premium: Utilizador com um estatuto superior ao utilizador Normal, que possui um determinado tipo de regalias.

A distinção entre estes tipos de utilizadores pode ser feita pela taxa cobrada pelo serviço prestado.

A ideia do sistema de reserva de energia é bastante simples. Como o nome indica, a ideia traduz-se por reservar uma parte da energia disponível para o carregamento dos veículos Premium. Por conseguinte, os veículos classificados como Normais apenas podem usar a energia não reservada, mesmo que no sistema não se encontrem veículos Premium, garantindo desta forma, que caso chegue um veículo Premium ao sistema este tenha energia reservada para si.

Por outro lado, no caso em que a energia reservada está a ser totalmente utilizada e existem veículos Premium no sistema que não se encontram a usufruir desta energia, estes veículos podem carregar com a energia não reservada.

Se por um lado este sistema de reserva de energia beneficia os utilizadores Premium, garantindo-lhe uma porção de energia, este facto conduz a um aumento de incumprimento dos requisitos dos veículos classificados como Normais, uma vez que, a energia disponível para estes veículos é menor.

### Formulação

O problema de reserva de energia pode ser formulado matematicamente. Para esse efeito, consideremos  $N$  o conjunto dos veículos ditos Normais que se encontram no sistema e  $PR$  a variável que representa a energia reservada para os utilizadores Premium. Este problema traduz-se por determinar variáveis binárias  $Z_{ij}$  que satisfaçam as restrições (2.1) e (2.2) do problema original, e ainda a seguinte restrição:

$$\sum_{i \in N} Z_{ij} \leq P - PR, \quad j = 1, \dots, \max\{T_i : i = 1, \dots, K\}. \quad (3.6)$$

Este conjunto de restrições garante que em cada instante temporal o número de veículos Normais que estão a ser carregados não é superior a  $P - PR$ , isto é, garante que os veículos Normais apenas carregam com a energia não reservada após a reserva de energia.

#### 3.3.1. Aplicação do Método da Folga

Um reajuste do método da folga permite-nos obter uma possível calendarização para o problema de carregamento de veículos eléctricos com reserva de energia. Este reajuste passa por em cada instante temporal:

- Carregar os  $PR$  veículos Premium com menor folga;
- Os veículos Premium não carregados com a energia reservada são agrupados aos veículos Normais;

- Neste novo conjunto de veículos carregamos os  $(P - PR)$  veículos com menor folga.

**Exemplo**

A título de exemplo, consideremos que no sistema encontram-se 7 veículos, dos quais os três primeiros correspondem a utilizadores Premium e os restantes correspondem a utilizadores Normais e que em cada instante temporal podemos carregar quatro veículos em simultâneo,  $P = 4$ , dos quais dois deles são obrigatoriamente Premium, isto é,  $PR = 2$ . Consideremos ainda que os instantes disponíveis e necessários ao carregamento destes veículos são, respectivamente,  $T = (4, 6, 4, 5, 5, 7, 6)$  e  $C = (3, 4, 3, 3, 2, 4, 3)$ . Uma possível calendarização do carregamento obtida através do método da folga é apresentada na Figura 3.6.

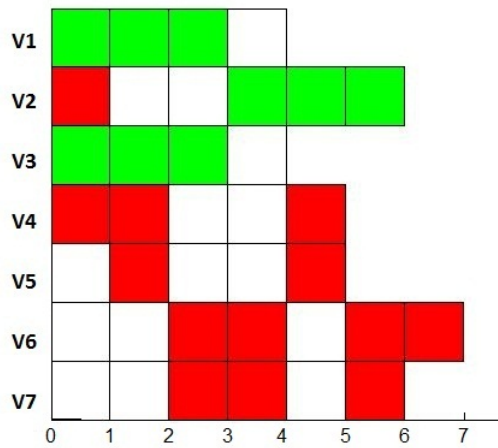


Figura 3.6: Plano com reserva de energia

Temos que os veículos  $V1$ ,  $V2$  e  $V3$  são utilizadores Premium e que carregam com a energia reservada (representada a verde). Os restantes veículos são os ditos Normais, que carregam com a energia não reservada (representada a vermelho). Observamos também que no primeiro instante temporal o veículo Premium  $V2$  é carregado com a energia não reservada, uma vez que os veículos  $V1$  e  $V3$  esgotaram a energia reservada.

**Limitações**

O método da folga aplicado ao sistema de reserva de energia apresenta algumas limitações. A mais relevante é o facto de não conseguir obter um plano de carregamento quando na verdade existe uma possível calendarização. Para melhor ilustrarmos

esta situação, consideremos o seguinte exemplo: no sistema encontram-se 5 veículos dos quais os 2 primeiros são Premium e que a energia total e reservada é, respectivamente,  $P = 2$  e  $PR = 1$ . Seja ainda  $T = (2, 2, 3, 3, 3)$  e  $C = (1, 1, 1, 1, 1)$  os instantes disponíveis e necessários ao carregamento destes veículos, respectivamente. Analisemos o comportamento do método da folga na Figura 3.7.

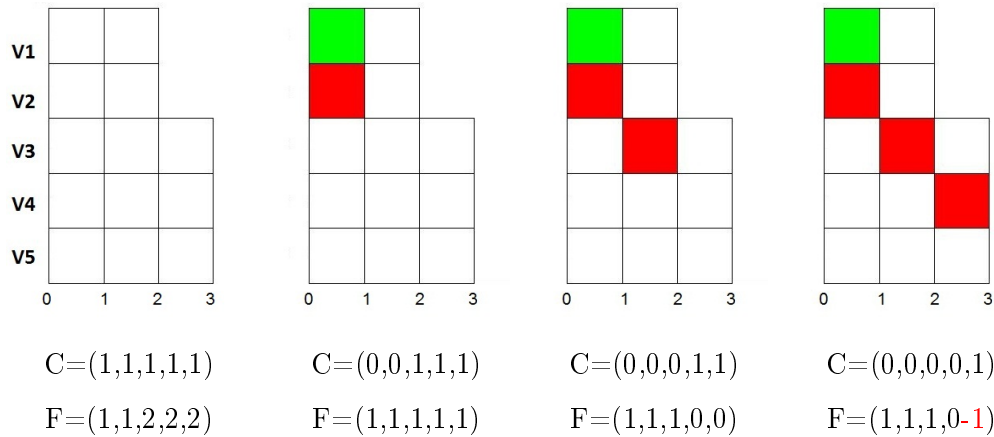


Figura 3.7: Procedimento do método da folga

No primeiro instante temporal, os dois veículos Premium apresentam a mesma folga, pelo que escolhemos um deles para ser carregado com a energia reservada, neste caso o veículo  $V1$ . Portanto, como o segundo veículo Premium não foi carregado com a energia reservada este é agrupado aos veículos Normais e deste conjunto veículos temos que seleccionar o veículo que possui menor folga. Desta forma, é escolhido o veículo Premium, veículo  $V2$ , para carregar. Consequentemente, no final do primeiro instante temporal temos os dois veículos Premium carregados com energia reservada e normal. Nos restantes instantes temporais, apenas é possível carregar um veículo (Normal) por instante, uma vez que uma porção de energia está reservada para um veículo Premium. Deste modo, chegamos ao ponto em que esgotamos o tempo disponível e falta carregar um veículo. No exemplo apresentado na Figura 3.7, este veículo corresponde ao veículo  $V5$  que não foi possível carregar.

Como vimos na Figura 3.7, o método da folga não determina um plano de carregamento que satisfaça os requisitos dos veículos presentes no sistema. Porém, existe uma calendarização possível que satisfaz todos os requisitos para a situação apresentada, um exemplo é apresentado na Figura 3.8.

Como podemos observar na Figura 3.8 se no primeiro instante temporal em vez de carregarmos os dois veículos Premium carregarmos um veículo Premium e um veículo Normal ( $V1$  e  $V3$ ) e no segundo instante temporal carregarmos o veículo Premium



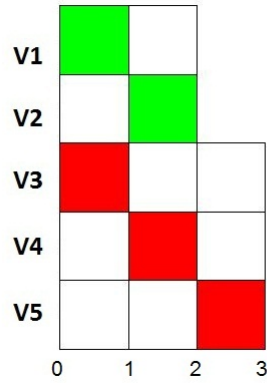


Figura 3.8: Possível plano de carregamento

que ainda necessita de carregar ( $V2$ ) e um veículo Normal ( $V4$ ), no terceiro e último instante temporal apenas temos um veículo ( $V5$ ) que necessita de carregar. Esta é uma maneira possível de planear o carregamento dos 5 veículos de forma a ser possível satisfazer todos os requisitos dos veículos no sistema.

Desta forma, concluímos que o método da folga aplicado ao sistema de reserva de energia pode não determinar uma calendarização mesmo em alguns casos em que uma existe.

No que diz respeito a solucionar o problema de calendarização do carregamento de veículos eléctricos com o sistema de reserva de energia existe ainda um outro aspecto a ter em consideração.

Suponhamos que num dado instante temporal a energia reservada está a ser totalmente usada e que no sistema existem ainda veículos Premium que necessitam de ser carregados. Pelo reajuste do método da folga, estes veículos Premium são reagrupados aos veículos classificados como Normais e deste novo conjunto de veículos vamos seleccionar os ( $P - PR$ ) veículos com menor folga para serem carregados. No que concerne a este processo de selecção, é necessário considerar a situação em que um veículo Premium e um veículo Normal possuam a mesma folga e apenas é possível efectuar o carregamento de um deles. É necessário analisar o procedimento a seguir neste caso.

Consideremos o seguinte exemplo: no sistema encontram-se 5 veículos dos quais os 3 primeiros são Premium e os restantes são Normais. Em cada instante temporal podemos carregar 3 veículos em simultâneo,  $P = 3$ , dos quais 2 destas possibilidades de carregamento estão reservadas para os Premium, isto é,  $PR = 2$ . Seja ainda  $T = (4, 6, 4, 5, 3)$  e  $C = (2, 5, 3, 3, 2)$  respectivamente, os instantes disponíveis e

necessários ao carregamento dos veículos no sistema. Analisemos nas Figuras 3.9 e 3.10 dois planos de carregamento obtidos pelo método da folga, que apenas diferem entre si na situação a analisar, isto é, quando é necessário escolher entre um veículo Premium e um veículo Normal com a mesma folga.

1. Plano em que optamos carregar o veículo Premium

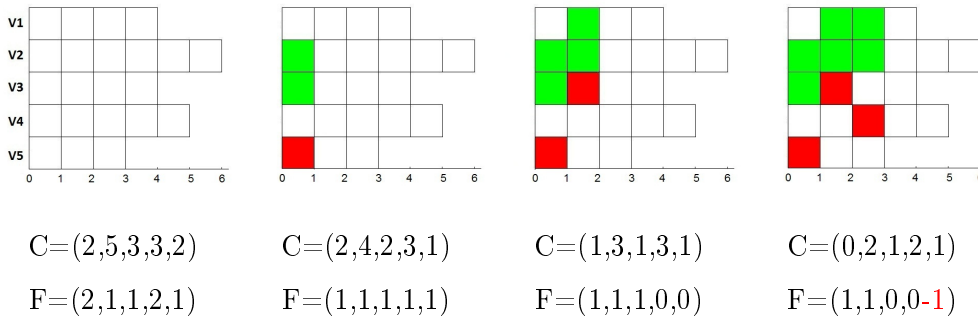


Figura 3.9: Prioridade ao veículo Premium

Ao observarmos a Figura 3.9 observamos que no 2<sup>o</sup> instante temporal, todos os veículos apresentam a mesma folga (folga 1). Optámos por carregar os veículos V1 e V2 com a energia reservada e com a energia não reservada escolhemos carregar o veículo Premium, V3, em vez dos veículos classificados como Normais. Sucede que, após o 3<sup>o</sup> instante temporal, o veículo V5 apresenta folga negativa, -1, que significa que este veículo precisa de mais um instante temporal do que tem disponível para completar o carregamento, o que é facilmente observado na Figura 3.9, uma vez que falta carregar durante um instante temporal e já não possui mais instantes disponíveis. Desta forma não é possível obter um plano de carregamento.

2. Plano em que escolhemos carregar o veículo Normal

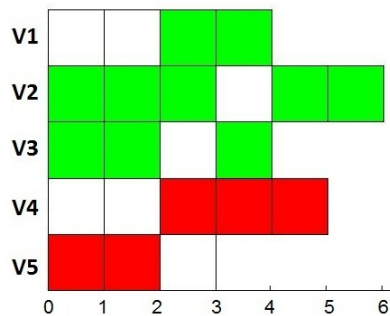


Figura 3.10: Prioridade ao veículo Normal

Ao observarmos o plano de carregamento apresentado na Figura 3.10 verificamos que são satisfeitos os requisitos de todos os veículos que se encontram no sistema.

Concluimos que a ordem de prioridade considerada influencia a determinação ou não de um plano de carregamento exequível, ao contrário do que acontecia com o método da folga simples (ver secção 2.4). Testes numéricos não demonstram grande diferença em termos de percentagem de veículos aceites quando alteramos a prioridade nos desempates. Nos nossos testes se num dado instante, for necessário optar pelo carregamento de um veículo Normal ou de um veículo Premium através da energia não reservada, escolhemos carregar o veículo Normal. Esta escolha é justificada por os veículos Premium usufruírem de uma parte da energia a que os veículos Normais não têm acesso, isto é, posteriormente o veículo Premium terá mais energia disponível para o carregamento do que o veículo Normal teria, dado que este último apenas pode carregar com a energia não reservada.

#### 3.3.2. Reaproveitamento de energia

Ao implementarmos o sistema com reserva de energia, apenas os utilizadores Premium usufruem da energia reservada, o que conduz a um desperdício de energia. Isto é, dado que uma parte da energia é reservada para os utilizadores Premium pode suceder que num dado instante temporal, exista energia reservada que não esteja a ser utilizada, mesmo que no sistema se encontrem veículos que necessitam de carregar. Tal acontecimento não é rentável. Por um lado temos energia que não está a ser utilizada, por outro lado se utilizássemos esta energia poderíamos completar o carregamento dos veículos antecipadamente. Consequentemente, aumentariam as hipóteses de satisfazer os requisitos de um veículo que chegasse ao sistema.

Para contornar esta situação, apresentamos uma ideia de reaproveitamento de energia.

Suponhamos que determinamos um plano de carregamento para os veículos que se encontram no sistema através do reajuste do método da folga para o sistema com reserva de energia. Suponhamos ainda que existe um instante temporal desse plano em que a energia reservada não está a ser totalmente utilizada e existem veículos que não carregaram nesse instante. Obviamente, estes veículos são veículos Normais, uma vez que se fossem veículos Premium carregariam com a energia reservada. A ideia do reaproveitamento de energia traduz-se por utilizar a energia reservada restante, isto

é, a que não foi utilizada, para proceder ao carregamento dos veículos Normais que não foram carregados nesse instante. Nos instantes posteriores, aplica-se o reajuste do método da folga e procede-se da mesma forma caso existia energia reservada não utilizada e veículos no sistema não carregados.

Se um veículo Premium que posteriormente chegasse ao sistema tivesse ao seu dispor energia reservada, esta ideia de reaproveitamento de energia não altera esse facto, uma vez que inicialmente determinamos um plano de carregamento que satisfaz os requisitos de todos os veículos sem que os classificados como Normais utilizem a energia reservada.

Uma das vantagens deste processo de reaproveitamento de energia é a possibilidade de completar o carregamento dos veículos Normais mais cedo do que aconteceria se não carregassemos estes veículos com a energia reservada. Uma outra vantagem é a hipótese de utilizarmos o máximo de energia possível em cada instante.

Consideremos o seguinte exemplo, em que no sistema se encontram 6 veículos dos quais os 3 primeiros são veículos Normais e os restantes são Premium e que em cada instante é possível carregar 5 veículos em simultâneo,  $P = 5$ , dos quais no máximo 2 são normais, conseqüentemente  $PR = 3$ . Seja ainda  $T = (6, 4, 7, 4, 3, 2)$  e  $C = (4, 3, 5, 3, 3, 2)$  respectivamente os instantes disponíveis e necessários ao carregamento dos veículos. Nas Figuras 3.11 e 3.12 apresentamos respectivamente um plano com reserva de energia em que não é possível carregar veículos Normais com energia reservada e um plano com reaproveitamento de energia.

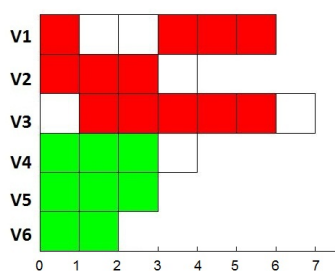


Figura 3.11: Sem reaproveitamento de energia

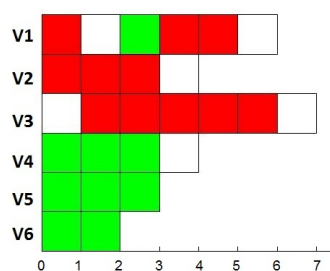


Figura 3.12: Com reaproveitamento de energia

Observando o plano sem reaproveitamento de energia (Figura 3.11) verificamos que no 3<sup>o</sup> instante temporal apenas carregam 4 dos 5 veículos possíveis. Este facto já não sucede no plano com reaproveitamento de energia (Figura 3.12) onde, nesse mesmo instante, carregamos 5 veículos, uma vez que permitimos que o veículo Nor-

mal  $V1$  carregue com energia reservada. Desta forma, é possível completar o carregamento deste veículo um instante temporal mais cedo do que no plano em que não consideramos o reaproveitamento de energia (Figura 3.11).



# Capítulo 4

## Resultados numéricos

Neste capítulo pretendemos avaliar o desempenho das abordagens propostas para a gestão do planeamento de carregamento dos veículos eléctricos. Devido à falta de dados reais vamos proceder a uma simulação de um sistema com o intuito de avaliar ao longo de um certo período de tempo, se a chegada de um novo veículo eléctrico a este sistema impossibilita ou não a obtenção de um plano de carregamento. Caso seja impossível obter um plano de carregamento então o veículo que chegou ao sistema não é carregado, caso contrário é obtido um novo plano de carregamentos que é posto em prática.

Por fim, é avaliada a percentagem de veículos eléctricos carregados com sucesso, isto é, aqueles que no momento da sua chegada ao sistema foi possível determinar um plano de carregamento que satisfizesse os seus requisitos e os dos veículos já existentes no sistema.

### 4.1. Geração de dados

Devido à inexistência de dados reais necessitamos de gerar dados para ser possível obter conclusões.

Para gerar os instantes de chegada dos veículos eléctricos ao sistema (dado em horas), recorreremos a um estudo do Sistema de Mobilidade da Região de Mondego [18], por intermédio da dissertação de Joana Cavadas [5], que nos indica o número de veículos estacionados em zonas residenciais e comerciais da cidade de Coimbra ao longo de um dia, apresentado na Figura 4.1.

Ao observarmos a Figura 4.1(b) apercebemo-nos da existência de um pico por volta das 11h e um segundo pico por volta das 16h e de valores praticamente nulos durante o período nocturno. No entanto, estes dados não correspondem exactamente aos dados que procuramos, uma vez que pretendemos os instantes de chegada e não a permanência dos veículos nestes locais.

Para simular a procura numa hipotética zona comercial, gerámos os instantes de

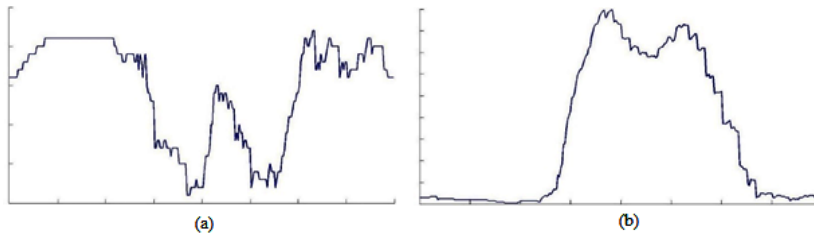


Figura 4.1: Número de veículos estacionados em zonas residenciais (a) e comerciais (b) da Cidade de Coimbra ao longo de um dia.

chegada dos veículos eléctricos ao sistema através de duas leis gaussianas com médias 9 e 18, sendo que foram seleccionados estes valores tendo em vista uma aproximação grosseira dos picos observados. Apresentamos na Figura 4.2, o histograma que representa a chegada dos veículos eléctricos ao longo do dia.

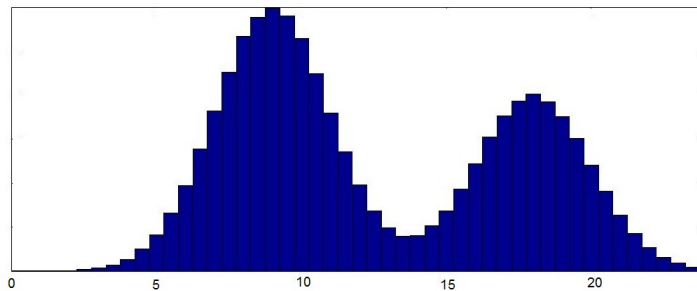


Figura 4.2: Chegada dos veículos eléctricos ao sistema

Por forma a simplificar, os instantes disponíveis e necessários ao carregamento dos veículos foram considerados números aleatórios gerados por leis uniformes. Devido ao facto de o carregamento total de um veículo eléctrico poder demorar entre 4 a 8 horas (US. Department of Energy [22]), os instantes disponíveis foram gerados por uma lei uniforme no intervalo  $[2, 8]$ . Quanto aos instantes necessários foram gerados segundo uma lei uniforme no intervalo  $[1, T_i]$ , sendo  $T_i$ , o número gerado para o tempo disponível.

Na Figura 4.3 apresentamos o número médio de veículos que se encontram no sistema simulado durante o dia, considerando que cada curva corresponde à chegada de um determinado número de veículos por dia ao sistema.

## 4.2. Análise comparativa do Método da Folga

Começamos por analisar o comportamento do método da folga e do método sem interrupções. Para tal efeito, variámos o número  $n$  de veículos eléctricos que chegam



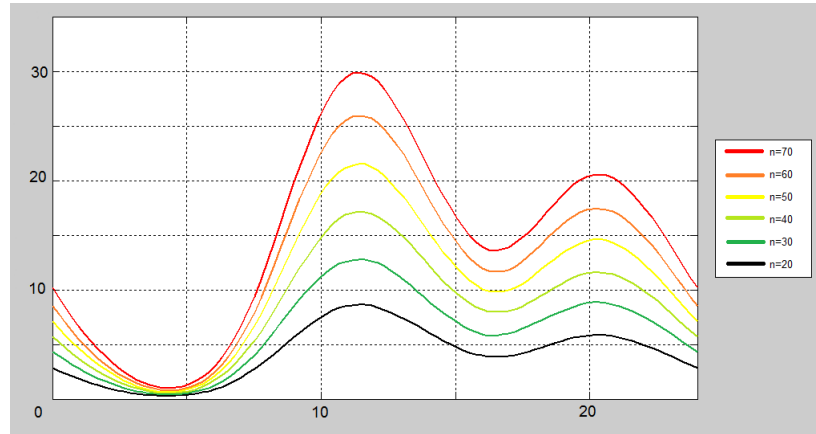


Figura 4.3: Número médio de veículos ao sistema

ao sistema e a energia disponível,  $P$ . Para cada par  $(n, P)$  simulámos um ano de utilização do sistema calculando a percentagem de veículos aceites. Nas Figuras 4.4 e 4.5 apresentamos os dados obtidos representando as percentagens por cores.

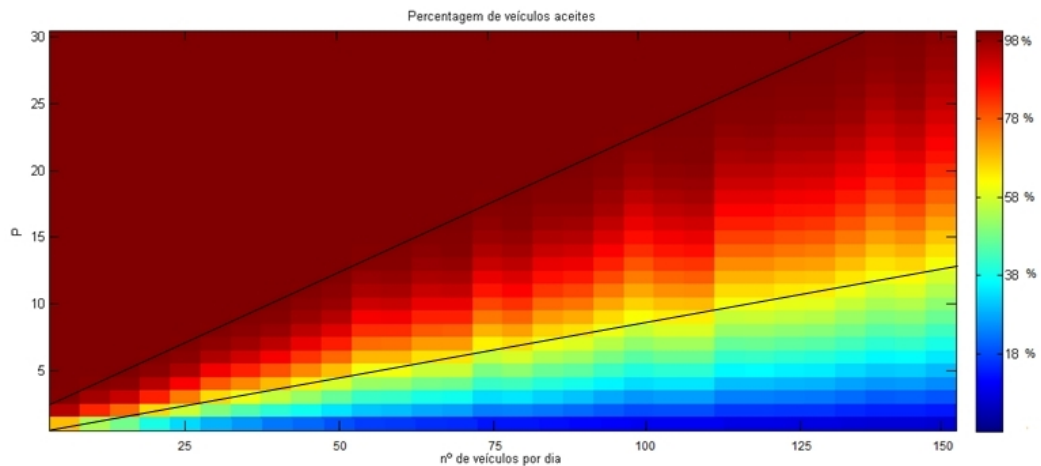


Figura 4.4: Método da folga

A região a castanho-avermelhado mais escuro (acima da linha superior) corresponde a valores de aceitação de 100% e a zona azul escuro corresponde aproximadamente a 10% de veículos aceites no sistema. A zona amarela (linha inferior) corresponde a valores de aceitação por volta dos 60% e a zona verde aos 50%.

Analisando as Figuras 4.4 e 4.5 concluímos que, como era de esperar, o método da folga têm maior valores de percentagem de aceitação que o método sem interrupções. A zona sombreada na Figura 4.5 corresponde aos pares  $(n, P)$  em que o método da folga apresenta uma percentagem de veículos aceites de 100% e o método sem interrupções uma percentagem inferior a 100%. Observamos também que se a razão

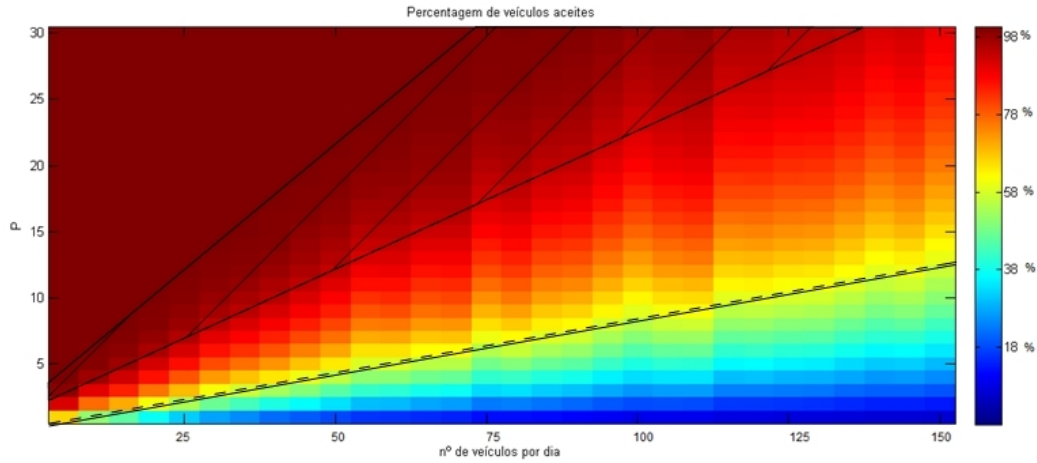


Figura 4.5: Método sem Interrupções

entre a energia disponível e o número de veículos que chegam ao sistema for bastante elevada, as percentagens de veículos aceites são bastante semelhantes em ambos os métodos.

De seguida comparemos o método da folga (secção 2.4) com o método sem interrupções (secção 2.2) e o método desenvolvido na abordagem contínua (secção 2.5). Simulámos dados relativamente a 3 anos e o número de veículos gerados por dia variou de 10 em 10 no intervalo [20, 70]. O valor da energia disponível foi fixado em  $P = 4$ . Apresentamos na Figura 4.6 um gráfico que contém as percentagens de veículos aceites pelo sistema.

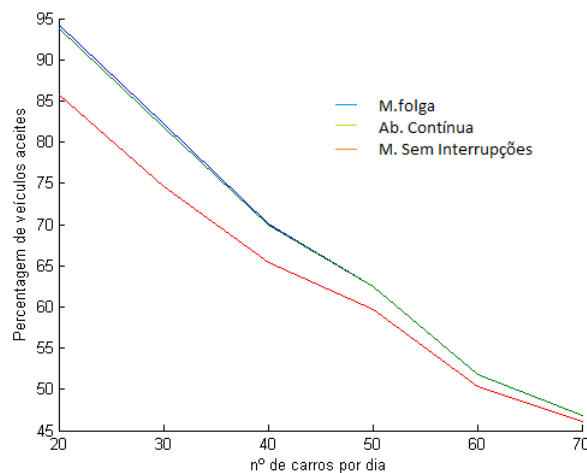


Figura 4.6: Percentagem de veículos aceites

Na Figura 4.6 são representadas as percentagens de veículos eléctricos aceites pelo sistema através dos vários métodos. Notemos que a percentagem de veículos sofre

uma descida acentuada à medida que o número de veículos que chegam ao sistema por dia aumenta.

Observamos que o método sem interrupções é o que apresenta a percentagem mais baixa de veículos aceites. Quanto ao método da folga e ao método da abordagem contínua concluímos que possuem resultados muito semelhantes. Apresentamos na Tabela 4.1 os resultados com o intuito de analisar melhor estes dois métodos.

Veículos por dia	M. Folga	Ab. Contínua	M. sem Interrupções
20	94.2420	93.8676	85.7854
30	82.1370	81.7534	74.5632
40	70.0251	69.9429	65.3790
50	62.4365	62.4712	59.7059
60	51.7839	51.8372	50.3622
70	46.7854	46.8506	46.0926

Tabela 4.1: Percentagem de veículos aceites

Ao analisarmos a Tabela 4.1, concluímos que o método da folga e o método desenvolvido na abordagem contínua apresentam um comportamento muito semelhante, verificamos que a diferença deles é mínima, não chegando a atingir o 1%. Qualquer um dos métodos é um bom método para determinar uma calendarização de carregamento de veículos eléctricos.

## 4.3. Extensões

### 4.3.1. Minimização de trocas

No âmbito da minimização de trocas, analisemos agora a percentagem de veículos aceites e o número médio de trocas.

Mais uma vez gerámos dados relativamente a 3 anos. Fixámos  $P = 25$  e variámos o número de carros gerados por dia entre 50 a 900 com intervalos de 50. Na Figura 4.7 observamos o gráfico relativo à percentagem de veículos aceites.

Dado que o método das trocas é o método da folgas com um pós-processamento seria de esperar que a percentagem de veículos aceites no sistema não diferisse muito entre estes dois métodos, tal pode ser comprovado ao visualizar a Figura 4.7, que mostra que a perda de eficiência embora visível é negligível.

Verificamos também que à medida em que o número veículos por dia no sistema aumenta, a energia disponível para o carregamento dos veículos torna-se bastante

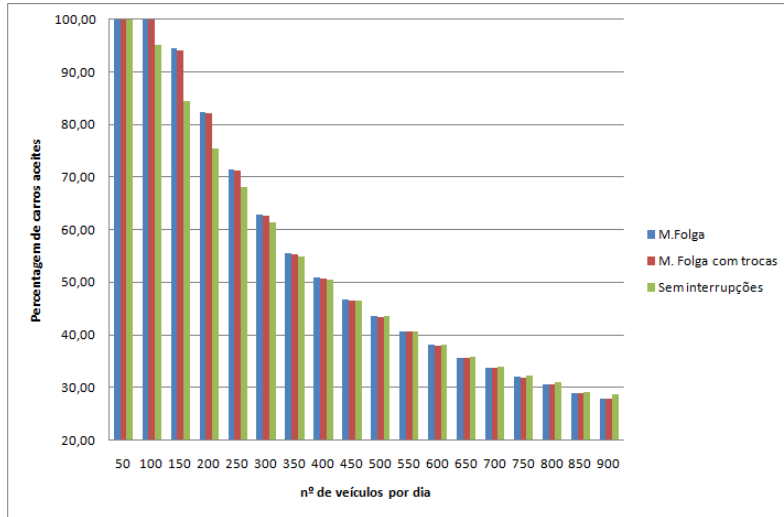


Figura 4.7: Percentagem de veículos aceites

inferior ao número de veículos por dia. Consequentemente, os métodos comportam-se de forma muito semelhante, pelo que, dado que pretendemos minimizar as trocas nestes casos, o melhor método é o método sem interrupções. Notemos no entanto que estes casos têm pouca importância em termos práticos.

Analisemos o caso em que não se verifica uma disparidade tão acentuada entre o número de veículos que chegam ao sistema e a energia disponível, no que diz respeito ao número médio de trocas dos vários métodos, é apresentado na Figura 4.8.

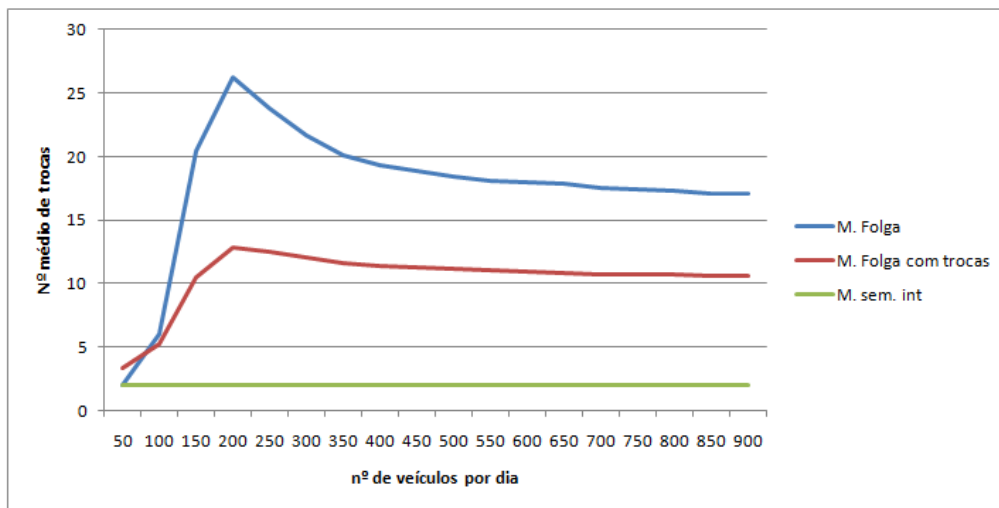


Figura 4.8: Número médio de trocas

Ao analisarmos a Figura 4.8 concluímos que, como seria de esperar, o método sem pós-processamento efectua um número mais elevado de trocas, excepto quando

o número de veículos que podemos carregar por instante,  $P$ , é bastante elevado. Se considerarmos que o número de veículos que chegam ao sistema é não superior ao dobro da energia disponível então, neste caso, o método sem processamento apresenta menos trocas.

### 4.3.2. Sistema de reserva de energia

Analisemos agora os ganhos quando permitimos a reserva de energia. Simulámos 3 conjuntos de dados em que cada conjunto corresponde a um período de 20 dias e que por dia chegam ao sistema 150 veículos eléctricos por dia. Do total dos 3000 veículos que chegam ao sistema durante o período de simulação considerámos que 600 são do tipo Premium. Considerámos ainda que a energia disponível é  $P = 20$ . Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.9.

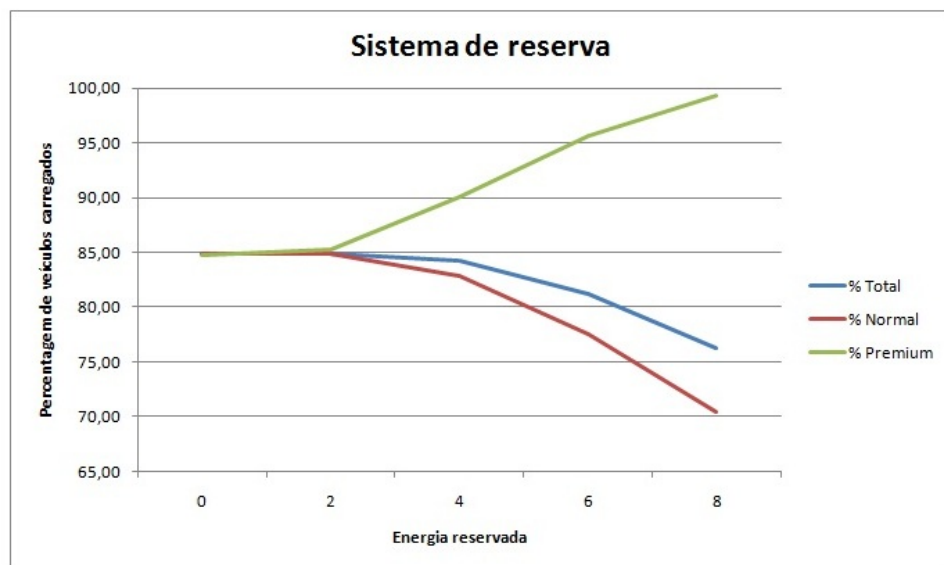


Figura 4.9: Sistema de reserva

Observando a Figura 4.9, verificamos que, como seria de esperar, à medida que a energia reservada aumenta verificamos também um aumento da percentagem de veículos Premium aceites. Como também seria de esperar a percentagem de veículos normais carregados diminui uma vez que possuem menos energia disponível para o seu carregamento. Consequentemente, como apenas  $\frac{1}{5}$  dos veículos são veículos Premium, a percentagem do total de veículos aceites também diminui.

Como vimos na subsecção 3.3.1, o método da folga aplicado ao sistema de reserva nem sempre obtém um plano de carregamento quando na verdade existe uma possível calendarização. Vamos considerar a abordagem contínua, descrita na secção 2.5, com uma modificação que permite reserva de energia, uma vez que esta abordagem determina sempre uma solução caso exista. Procederemos à comparação entre esta abordagem e o método da folga aplicados à reserva de energia, para determinarmos a dimensão desta limitação do método da folga.

Definindo  $N$  como o conjunto dos índices dos veículos normais no sistema, o problema do sistema de reserva abordado de forma contínua é dado pelo problema descrito na abordagem contínua (secção 2.5) com a seguinte restrição:

$$\sum_{i \in N \wedge i \geq j} y_{ij} \leq (P - PR), \quad j = 1, \dots, K,$$

sendo  $PR$  a energia reservada.

Na Figura 4.10, apresentamos um gráfico relativamente aos dados anteriormente descritos. Fixámos a energia reservada em  $PR = 6$  (30% da energia total).

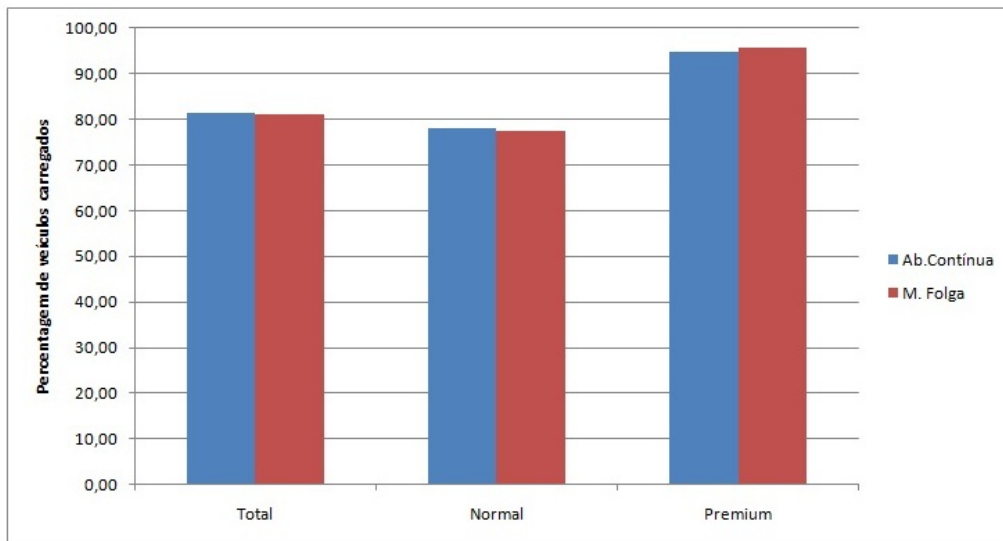


Figura 4.10: Comparação entre abordagem contínua e método da folga

Ao analisarmos a Figura 4.10, observamos que a diferença de percentagem de veículos carregados utilizando o método da folga ou a abordagem contínua é mínima, levando-nos a concluir que apesar da limitação do método da folga, este continua a ser um método com resultados viáveis.

Por último, vejamos a situação em que permitimos o reaproveitamento de energia. Mais uma vez consideramos o conjunto de dados descritos anteriormente (no início

desta subsecção) e apresentamos os resultados na Figura 4.11.

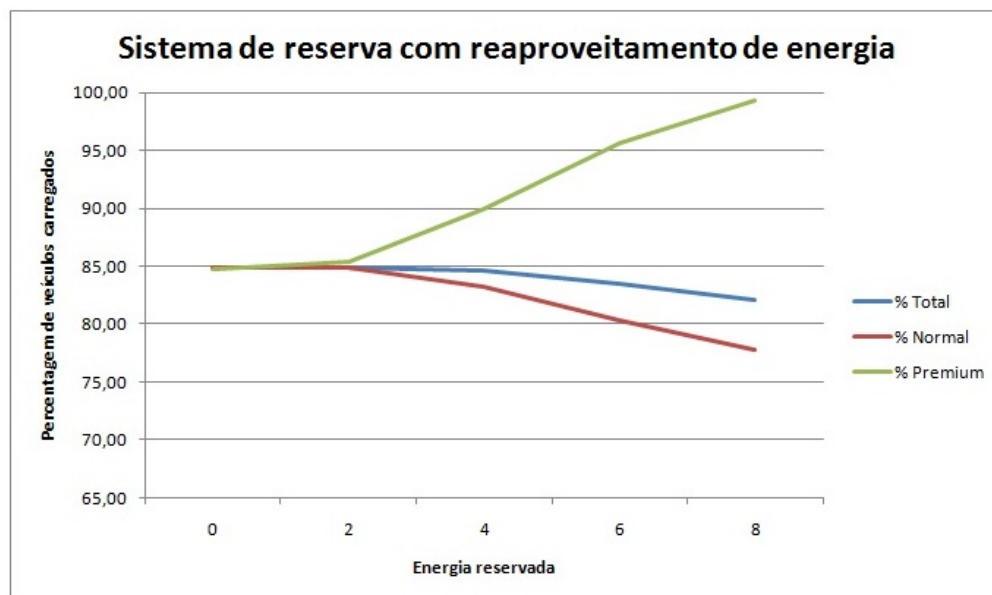


Figura 4.11: Sistema de reserva com reaproveitamento de energia

Comparando as Figuras 4.11 e 4.9, verificamos que a percentagem de veículos Premium carregados se mantém. No que diz respeito à percentagem dos veículos normais e conseqüentemente do total de veículos, observamos uma percentagem de veículos carregados superior quando permitimos o reaproveitamento de energia, como seria de esperar. Apresentamos nas Tabelas 4.2 e 4.3 as percentagens de veículos carregados por forma a ser mais explícito o ganho.

PR	% Total	% Normal	% Premium
0	84,8444	84,8611	84,7778
2	84,9333	84,8472	85,2778
4	84,2778	82,8194	90,1111
6	81,1778	77,5694	95,6111
8	76,2111	70,4444	99,2778

Tabela 4.2: Sistema de reserva sem reaproveitamento

PR	% Total	% Normal	% Premium
0	84,8444	84,8611	84,7778
2	84,9333	84,8333	85,3333
4	84,6333	83,2917	90,0000
6	83,4333	80,3750	95,6667
8	82,0444	77,7222	99,3333

Tabela 4.3: Sistema de reserva com reaproveitamento

Analisando as Tabelas 4.2 e 4.3 verificamos que se reservamos 40% da energia disponível para os veículos Premium ( $PR = 8$ ) e se permitirmos o reaproveitamento de energia temos um ganho de aproximadamente 6% do total de veículos carregados

uma vez que o sistema carrega aproximadamente mais 7% veículos normais.



## Capítulo 5

# Conclusão

Neste trabalho estudámos o problema de calendarização do carregamento dos veículos eléctricos considerando uma possibilidade não muito utilizada nas abordagens deste problema, a possibilidade de interrupção do carregamento dos veículos.

O problema foi analisado sobre duas perspectivas, uma abordagem discreta e uma abordagem contínua, sendo que a abordagem em que se considerou a discretização do tempo é a mais desenvolvida neste trabalho. Para solucionar o problema discreto foi desenvolvido um método de resolução que designamos método da folga, baseado na regra de despacho com o mesmo nome. Abordámos algumas vertentes adicionais do problema da calendarização do carregamento de veículos eléctricos, nomeadamente o caso não admissível e a possibilidade de um sistema de reserva, desenvolvendo extensões do método da folga para estas variantes.

Numa fase final deste trabalho procedemos à análise comparativa dos métodos utilizados. Resultados numéricos mostraram que a permissão de interrupções resulta num aumento significativo da percentagem de veículos aceites no sistema. No que diz respeito ao método da folga, verificamos que este é de facto um bom método para solucionar as várias vertentes do problema. Analisamos também a complexidade do método da folga que nos permitiu concluir que este método é de rápida execução, facto vantajoso se considerarmos que este método pode ser utilizado no dia a dia para dar resposta ao problema de gestão de carregamentos.

Ao longo deste trabalho algumas dificuldades foram surgindo. Devido à baixa utilização do veículo eléctrico, não possuímos dados reais para analisar, o que conduziu a uma simulação de dados numa tentativa de uma previsão coerente. Relativamente ao método da folga alguns aspectos necessitam de ser considerados, nomeadamente o caso em que os veículos possuem a mesma folga e é preciso efectuar a escolha dos veículos a carregar. Se, por um lado, no método da folga simples qualquer processo de selecção resolve o problema, no método da folga aplicado ao sistema de reserva de energia isto já não se verifica. Nesta situação, a escolha dos veículos a carregar

(Premium ou Normal) influencia a obtenção ou não de um plano de carregamento.

Nos últimos tempos temos assistido a um investimento na produção e venda de veículos eléctricos e híbridos por parte da indústria automóvel, devido às vantagens relacionadas com o transporte eléctrico nomeadamente, a eficiência e a independência energética e os benefícios em termos de performance e componente ambiental. Com o aumento da produção de veículos eléctricos surge a necessidade de responder ao problema de gestão do carregamento destes veículos. Este trabalho visa poder proporcionar uma resposta a este problema, sendo inovador no sentido em que tanto quanto temos conhecimento, não existem sistemas de carregamento que considerem a possibilidade de interromper o carregamento.

# Bibliografia

- [1] Adams, J.; Balas, E.; Zawack, D. (1988). *The shifting bottleneck procedure for job shop scheduling* Management Science
- [2] Bashash, S.; Moura, S.; Fathy, H. (2010). *Charge trajectory optimization of plug-in hybrid electric vehicles for energy cost reduction and battery health enhancement* American Control Conference
- [3] Blackstone, J.; Phillips D.; Hogg, G. (1982). *A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations* International Journal of Production Research
- [4] Camus, C.; Silva, C.; Farias, T.; Esteves, J.(2009). *Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicles in the Portuguese electric utility system* IEEE POWERENG International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives
- [5] Cavadas, J. (2013) *Planeamento de uma rede de carregamento para veículos eléctricos* Dissertação de Mestrado em Matemática pela Universidade de Coimbra
- [6] Clement, K.; Haesen, E.; Driesen, J.(2009). *Coordinated charging of multiple plug-in hybrid electric vehicles in residential distribution grids* IEEE Power Systems Conference and Exposition
- [7] Dell’Amico, M.; Trubian, M. (1993). *Applying tabu search to the job-shop scheduling problem* Annals of Operations Research
- [8] French, S. (1982). *Sequencing and Scheduling* New York: Ellis Horwood Ltd..
- [9] Hadley, S.; Tsvetkova, A.(2009). *Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on regional power generation* The Electricity Journal
- [10] Jain, A.; Meeran S. (1998). *A state-of-the-art review of job-shop scheduling techniques* Technical report, University of Dundee

- [11] Leemput, N.; Van Roy, J.; Geth, F.; Tant, P.; Claessens, B.; Driesen, J.(2011) *Comparative analysis of coordination strategies for electric vehicles* IEEE PES Int. Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe)
- [12] Masuch, N.; Keise, J.; Ltzenberger, M.; Albayrak, S.(2012). *Wind Power-Aware Vehicle-to-Grid Algorithms for sustainable EV Energy Management Systems* IEEE International Electric Vehicle Conference
- [13] Peterson, S.; Apt, J.; Whitacre, J. (2010). *Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid-utilization* Journal of Power Sources
- [14] Pinedo, M. (2005). *Planning and scheduling in manufacturing services* New York: Springer.
- [15] Pinedo, M.; Chao, X. (1999). *Operations scheduling with applications in manufacturing and services* Boston: Irwin/McGraw-Hill.
- [16] Putrus, G.; Suwanapingkarl, P.; Johnston, D.; Bentley, E.; Narayana, M.(2009). *Impact of electric vehicles on power distribution networks* IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference
- [17] Shrestha, G.B.; Ang, S.G. (2007) *A study of electric vehicle battery charging demand in the context of Singapore* Power Engineering Conference
- [18] Sistema de Mobilidade da Região do Mondego. (2009) *Inquérito à Mobilidade da Região do Mondego* Database Metabase. Coimbra, Portugal.
- [19] Sundström, O.; Binding, C.(2010). *Optimization Methods to Plan the Charging of Electric Vehicle Fleets* Proc. of the International Conference on Control, Communication and Power Engineering
- [20] Yamada, T.; Nakano, R. (1996). *Job-Shop Scheduling by Simulated Annealing Combined with Deterministic Local Search* Kluwer academic publishers, MA
- [21] Zhang, T.; Chen, W.; Han, Z.; Cao, Z.(2013). *Charging Scheduling of Electric Vehicles with Local Renewable Energy under Uncertain Electric Vehicle Arrival and Grid Power Price* arXiv preprint arXiv:1301.2457
- [22] US. Department of Energy. <http://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>